



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

DEPARTMENT OF BIOMEDICINAL ENGINEERING

TVAROVÁ ANALÝZA OBRAZOVÝCH DAT

IMAGE DATA SHAPE ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Kylián

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Chmelík

BRNO 2017

VLOŽTE ORIGINÁLNÍ ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ / BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Poznámka:

**Červeným písmem je uvedeno to, co má být aktualizováno!**

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá tvarovou analýzou obrazových dat, popisuje tedy metody, techniky a postupy, které k takové analýze vedou. Obsah práce je rozdělen do tří kapitol – Teoretická, řešení studentské práce a závěr.

V části teorie jsou popsány metody, které jsou následně využity v části řešení, ale i obecná teorie přímo související s tématem. Pravidlem je tedy, že použitá metoda v části řešení je popsána v části teoretické do detailů, nicméně tato skutečnost nemusí nutně platit i naopak.

V návaznosti na kapitolu teoretickou je řešení studentské práce. V kapitole řešení studentské práce je prezentován problém, který je, díky znalostem z teorie, vyřešen. Řešení sestává z více analytických procesů a patřičných příprav, které jsou v této části zcela jasně definovány.

Poslední část, závěr, slouží jako shrnutí přípravy, průběhu a zhodnocení řešení analýzy. Zároveň může posloužit jako prostor pro prezentaci nápadů, analogií, neprezentovaných metod a jiných postupů, které by mohly mít kladný či záporný vliv na výsledek práce, tedy i na její závěr.

## **Klíčová slova**

analýza, tvar, obrys, obraz, deskriptor, generování

## **Abstract**

Bachelor thesis is focused on shape analysis of image data. This thesis clarifies usage of methods, techniques and procedures that lead to such analysis. The content of this thesis is divided into three chapters – theory, analysis solution and conclusion.

In the chapter theory, methods and general theory of the topic are introduced. The rule is, that every method used in subsequent sections is explained in detail, but this doesn't necessarily mean that it applies in reverse.

Next chapter, following up the theory section is analysis solution. In this section, a problem is presented. This problem is then, with knowledge presented in chapter theory solved. The solution consists of many processes and preparations that are also explained in detail in this chapter.

## **Keywords**

analysis, shape, contour, image, descriptor, generating

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Tvarová analýza obrazových dat jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **2. června 2017**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Chmelíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne **2. června 2016**

.....  
podpis autora

# Obsah

Úvod .....	1
1 TEORETICKÁ ČÁST .....	2
1.1 PŘÍPRAVA OBRAZOVÝCH DAT .....	2
1.1.1 MORFOLOGICKÉ ZPRACOVÁNÍ OBRAZU .....	3
1.1.2 ODSTRANĚNÍ ŠUMU .....	5
1.1.3 DETEKCE REGIONŮ .....	6
1.2 TVAROVÁ ANALÝZA .....	7
1.2.1 TVAROVÉ DESKRIPTORY 2D OBRAZOVÝCH DAT .....	7
1.2.2 TOPOLOGICKÉ PRVKY .....	9
1.2.3 POKROČILÉ METODY TVAROVÉ ANALÝZY .....	11
1.2.4 DESKRIPTORY 3D OBRAZOVÝCH DAT .....	14
1.3 KLASIFIKACE OBRAZOVÝCH DAT .....	15
2 ŘEŠENÍ STUDENTSKÉ PRÁCE .....	18
2.1 REALIZACE METOD TVAROVÉ ANALÝZY .....	18
2.1.1 DETEKCE REGIONŮ .....	19
2.1.2 ZÍSKÁNÍ DESKRIPTORŮ .....	20
2.2 GENEROVÁNÍ ZÁKLADNÍCH 2D OBRAZŮ .....	21
2.3 REÁLNÁ OBRAZOVÁ DATA .....	31
2.3.1 VÝSLEDKY ANALÝZY .....	31
2.3.2 KLASIFIKACE OBRATLŮ .....	33
2.4 GENEROVÁNÍ ZÁKLADNÍCH 3D OBJEKTŮ .....	37
2.4.1 VÝSLEDKY ANALÝZY 3D OBRAZOVÝCH DAT .....	40
3 ZÁVĚR .....	41
3.1 PROBLÉMY REALIZACE TVAROVÉ ANALÝZY .....	41
3.2 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ .....	43
Literatura .....	46
Seznam příloh .....	48

# Seznam obrázků

Obr. 1: Obraz se nedefinovatelným obrysem, zdroj: [7].....	12
Obr. 2: Zernikovy momenty pro různé tvary a jejich rotaci, $n = 4$ , $m = 2$ .....	13
Obr. 3: Kartézská soustava pro 3D prostor.....	14
Obr. 4: Hammingova síť, $x$ – vstupy, $y$ – výstupy, $w$ – váhy, zdroj: [1].....	16
Obr. 5: Hopfieldova síť, $x$ – vstupy, $y$ – výstupy, $\mu$ – neurony, zdroj: [1] .....	17
Obr. 6: Generování a popis čtverce - a. čtverec vygenerovaný pomocí funkce VytvorCtverec(200) b. obrys generovaného čtverce, c. vzd. bodů obrysu od centroidu, d. 1D-FD generovaného tvaru .....	22
Obr. 7: Generování a popis obdélníku - a. obdélník vygenerovaný pomocí funkce VytvorObdelnik(100,400), b. obrys generovaného obdélníku, c. vzd. bodů obrysu od centroidu, d. 1D-FD generovaného tvaru .....	23
Obr. 8: Generování a popis kruhu - a. kruh vygenerovaný pomocí funkce VytvorKruh(201). obrys generovaného kruhu, c. vzd. bodů obrysu od centroidu, d. 1D-FD generovaného tvaru .....	25
Obr. 9: Generování a popis trojúhelníku - a. trojúhelník vygenerovaný pomocí funkce VytvorTrojuhelnik([200 224 224]), b. obrys generovaného trojúhelníku, c. vzd. bodů obrysu od centroidu, d. 1D-FD generovaného tvaru.....	26
Obr. 10: Generování a popis kosočtverce - a. kosočtverec vygenerovaný pomocí funkce VytvorKosoctverec(200,60), b. obrys generovaného kosočtverce, c. vzd. bodů obrysu od centroidu, d. 1D-FD generovaného tvaru.....	28
Obr. 11: Generování a popis mnohoúhelníku - a. mnohoúhelník vygenerovaný pomocí funkce VytvorMnolehelnik(7,300), b. obrys generovaného mnohoúhelníku, c. vzd. bodů obrysu od centroidu, d. 1D-FD generovaného tvaru .....	29
Obr. 12: Vyseparované části obratle a jejich obrys – a. první část obratle C3 prvního pacienta, b. druhá část obratle C3 prvního pacienta , c. obrys objektu z bodu a, f. obrys objektu z bodu b. ....	31
Obr. 13: Popis vyseparovaných částí obratle – a. vzdálenost bodu obrysu od centroidu pro první část obratle C3, b. vzdálenost bodu obrysu od centroidu pro druhou část obratle, c. 1D-FD pro první část obratle C3, d. 1D-FD pro druhou část obratle C3.....	32
Obr. 14: Hammingova síť, shluk 1 .....	34
Obr. 15: Hammingova síť, shluk 2 .....	34
Obr. 16: Hammingova síť, shluk 3 .....	34
Obr. 17: Hammingova síť, shluk 4.....	34
Obr. 18: Hammingova síť, shluk 5.....	34
Obr. 19: Stupně příslušnosti pro geometrické deskriptory .....	36



Obr. 20: Stupně příslušnosti pro 1D-FD .....	36
Obr. 21: Stupně příslušnosti pro zernikovy momenty .....	37
Obr. 22: Koule vygenerovaná pomocí funkce VytvorKouli(51).....	38
Obr. 23: Krychle vygenerovaná pomocí funkce VytvorKrychli(20) .....	38
Obr. 24: Kvádr vygenerovaný pomocí funkce VytvorKvádr(20,20,40) .....	39
Obr. 25: Jehlan vygenerovaný pomocí funkce VytvorJehlan(30,30,40).....	39

# Seznam tabulek

Tab. 1: Pomocná matice.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 2: Geometrické deskriptory čtverce.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 3: Zernikovy momenty pro čtverec(234) .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 4: Geometrické deskriptory pro obdélník.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 5: Zernikovy momenty pro obdélník(100,400)	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 6: Geometrické deskriptory pro kruh .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 7: Zernikovy momenty pro kruh(226) .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 8: Geometrické deskriptory pro trojúhelník.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 9: Zernikovy momenty pro trojúhelník(304 304 304)	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 10: Geometrické deskriptory pro kosočtverec	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 11: Zernikovy momenty pro kosočtverec(238,45)	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 12: Geometrické deskriptory pro mnohoúhelník	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 13: Zernikovy momenty pro mnohoúhelník(5, 300)	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 14: Geometrické deskriptory P1C3 .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 15: Zernikovy momenty P1C3 .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 16: Zernikovy momenty P1C3-2 .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 17: Klasifikace obratlů – binární.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 18: Vzdálenosti bodů obrysu od centroidu.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tab. 19: Ukázka kruhu o velikosti $r=1\text{px}$ .....	41

# ÚVOD

Tvarová analýza, jak již z název napovídá, je proces, jehož výsledkem je popis objektů (tvarů) nacházejících se v obrazových datech. Každý tvar je možné popsat pomocí mnoha deskriptorů, které mohou být založeny na matematické analýze, fourierově transformaci, momentech nebo jiných metodách. Získaný popis je možné využít v odvětvích jako je archeologie, architektura, biomedicína, počítačové vědy a jiné.

V této práci je kladen důraz především na využití analýzy pro biomedicínu a biomedicínská data, kde tvarová analýza může sloužit např. jako prostředek pro detekci změn nebo nesrovnalostí při diagnostických vyšetřeních, které jsou založeny na hodnocení snímků pacienta. Sofistikovanějším využitím tvarové analýzy může být klasifikace objektů v obraze a srovnání s objekty referenčními.

Skrze tuto práci budou prezentovány, vysvětleny a v poslední kapitole i aplikovány jednotlivé metody a procesy, které vedou k tvarové analýze.

Pro názornost a jednoduchost je tvarová analýza nejprve aplikována na generovaná obrazová data, která jsou předem jasně definovaná a slouží jako referenční data pro klasifikaci reálných dat. Reálná data, tedy biomedicínské snímky, podstupují stejnou analýzu a na základě hodnot, respektive rozdílů hodnot, odpovídajících deskriptorů je dosaženo objektivního porovnání tvarů.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část se skládá z podkapitol **příprava obrazových dat, tvarová analýza a klasifikace obrazových dat**. V každé ze zmíněných podkapitol jsou popsány metody a procesy, které jsou nezbytné pro provedení analýzy. Zároveň slouží tato kapitola jako předloha pro část řešení.

## 1.1 PŘÍPRAVA OBRAZOVÝCH DAT

Před samotnou tvarovou analýzou je nutné obraz zpracovat tak, aby bylo možné využít všechny metody popsané v následujících sekcích, které jsou závislé nebo alespoň významně benefitující právě ze správného předzpracování. Pokud by obraz zůstal nezpracován, metody by v mnoha případech nebyly spolehlivé a podávaly by zavádějící výsledky.

### **BINARIZACE**

Pro tuto práci je uvažováno obrazových dat z biomedicínské oblasti, které jsou v původní formě v naprosté většině definovány v šedotónové reprezentaci. Metody použité pro tvarovou analýzu předpokládají obraz černobílý (binární), proto je nutné původní obrazová data příslušně zpracovat a převést do černobílého provedení. Při převodu je nutné brát v potaz atributy definující původní obraz, na kterých je kvalita převodu přímo závislá. Převodu lze docílit např. pomocí prahování, při kterém jsou jednotlivé pixely obrazu zařazeny do jedné ze dvou skupin – černá (hodnota pixelu 0) nebo bílá (hodnota pixelu 1). Vyhodnocení je založeno na jednoduchém posouzení, zda je hodnota pixelu vyšší nebo nižší, než je hodnota zadaného prahu a zařazení do příslušné skupiny.

Problém nastává v případě, kdy je práh nastaven nevhodně, například na velmi vysokou hodnotu (relativní k obrazu) a pixely, které nesou informaci tak mohou být zařazeny do skupiny černá (hodnota 0), čímž dojde k nevratné ztrátě užitečné informace. Hodnota prahu je být definována ručně nebo automaticky s pomocí algoritmu, samotné prahování pak může být lokální, kdy je práh nastavován zvlášť pro každou oblast o určité velikosti či globální, kdy je práh pro celý obraz nastaven stejný. Pokud je již původní obraz v černobílém provedení, je možné tento krok ignorovat.

### 1.1.1 MORFOLOGICKÉ ZPRACOVÁNÍ OBRAZU

Výsledkem morfologického zpracování je změna obsahu binárních regionů v obraze na základě zvoleného strukturního elementu a hodnot v sousedících pixelech [2, 15]. Příslušná úprava je provedena v zadaném rozsahu, tedy lokálně nebo globálně.

Základními morfologickými operacemi jsou **eroze** a **dilatace**. Erozi rozumíme snižování obsahu regionů tak, že dochází ke změně stavů pixelů z hodnoty 1 na hodnotu 0. Změněny jsou pixely, které se nachází v místech přechodu mezi bílou a černou barvou (mezi hodnotami 1 a 0) pro daný region. Množství změn je dáno atributy strukturního elementu, který bude definován dále. Dilatace je proces opačný erozi, je tedy zvyšován obsah regionů podobným způsobem – dochází ke změně stavů pixelů z hodnot 0 na hodnoty 1 v místech přechodu definovaného výše. Množství je opět závislé na attributech strukturního elementu. Dilatace je zároveň jedním z procesů, který umožňují vyplnit díry (regiony s pixely hodnoty 0) uvnitř objektu. Tyto procesy jsou nejčastěji využívány v několika iteracích k docílení požadované úpravy obrazu, tzn. k redukci šumu, lokalizaci hran, tvorbě obrysů apod.

Dilatace a eroze nepatří pouze do morfologických operací, ale také do operací celulárních, které dosahují podobných výsledků, ale liší se použitými postupy. Jako jeden z rozdílů je možné uvést, že celulární zpracování má schopnost zachovat propojení objektů uvnitř obrazu [2]. Dalším rozdílem je schopnost morfologického zpracování volit velikost a tvar objektu, které budou procesy eroze a dilatace ovlivněny [2]. V této práci bude využito pouze morfologického zpracování obrazu.

#### EROZE A DILATACE

Operace morfologického zpracování jsou běžně využívány pro redukci šumu a detekci objektů v obraze. Šum by měl být potlačen co nejvíce, ale pouze do takové míry, aby procesy s tím spojené nedegradovaly samotný obraz.

Morfologické operace pracují se strukturními elementy. Základní strukturní element je možné si představit jako dvojrozměrnou matici  $S(i, j)$  o velikosti  $k_1 \times k_2$  [2]. Hodnoty v matici nabývají hodnot podle toho, jaký tvar má strukturní element představovat. Hodnoty nemusí být nastaveny symetricky, ale je nutné, aby byl explicitně nastaven počátek. Běžnými tvary strukturních elementů jsou: čtverec, kruh či orientovaná úsečka.

Každá morfologická operace probíhá tak, že je počátek strukturního elementu postupně aplikován na každý pixel a sousední pixely tak definuje jako  $N_S(i_0, j_0)$ , kde  $(i_0, j_0)$  jsou souřadnice počátku [2].

## EROZE

Eroze je proces, při kterém dochází ke zmenšování regionu a tvorbě děr v místě, kde se nachází počátek strukturního elementu. Pokud je počátek aplikován na pixel, kde nedochází k překrytí všech hodnot 1 strukturního elementu okolními pixely, je hodnota takového pixelu nastavena na 0. To způsobí snížení počtu pixelů s hodnotou 1. Pokud je počátek aplikován na pixel s hodnotou 1 a zároveň zde dochází k překrytí, hodnota pixelu zůstává 1. Proces eroze lze vyjádřit jako Minkowského rozdíl, tedy průnik všech posunů  $X$  o vektory  $-b \in B$ : [16, 17]

$$X \ominus B = \bigcap_{b \in B} X_{-b} \quad (1)$$

## DILATACE

Dilatace je proces, při kterém dochází ke zvětšování regionu a tím také k plnění děr v místě, kde se nachází počátek strukturního elementu. Pokud je strukturní element překryt hodnotami 1, je hodnota počátku změněna nebo mu tato hodnota zůstává v případě, že již hodnotu 1 měl. Takto dochází ke zvyšování počtu pixelů ve stavu 1. Rovnice procesu dilatace lze popsat jako Minkowského součet, tedy sjednocení všech posunů  $X$  o vektory  $-b \in B$ : [16, 17]

$$X \oplus B = \bigcup_{b \in B} X_b \quad (2)$$

## MORFOLOGICKÉ OTEVŘENÍ A ZAVŘENÍ

Základní morfologické transformace se skládají z kombinace eroze a dilatace. Proces otevření je zahájen erozí, která snižuje šum, vyhlazuje hrany a „rozpojuje“ úzká místa. Následuje dilatace, která vrací regiony přibližně do svých původních velikostí a vyplňuje vzniklé díry. Proces zavření je opakem otevření, dilatace tedy předchází erozi.

Výběr mezi těmito procesy je dán příznaky v obraze. Při velkém počtu menších objektů je výhodnější využít otevření z důvodu snížení šumu. Naopak, pokud v obraze došlo k nežádoucímu rozdělení regionů, ať už v důsledku eroze či jako chyba snímání, je vhodné použít zavření, aby bylo propojení obnoveno.

## DALŠÍ MORFOLOGICKÉ ÚPRAVY

V kapitole **řešení studentské práce** jsou využity metody zpracování, které byly popsány výše, pro úplnost je ovšem nutné se zmínit i o dalších možnostech zpracování obrazu:

- Celulární zpracování
- Top-hat transformace

- Bottom-hat transformace
- Hit-and-Miss
- Skeletonizace
- Distanční mapa
- Komplement obrazu
- Binární sjednocení a průnik
- Šedotónová inkluze
- A další...

### 1.1.2 ODSTRANĚNÍ ŠUMU

Většina analytických metod je závislá nebo alespoň významně benefitující ze zlepšení poměru signál/šum. Obraz s nižším zastoupením šumu má tendenci být spolehlivější a robustnější pro další manipulaci [2]. Zároveň jsou z obrazu odstraněny přebytečné informace a obraz je proto menší z hlediska paměti.

V této sekci jsou popsány druhy šumu, s kterými je možné se v biomedicínském prostředí setkat. Těmi nejčastějšími jsou Gaussovský šum a impulsní šum [6]. Dále je nutné zmínit i druhy méně časté: „shot“ (Poissonův) šum, „rician“ šum. Tato práce ovšem není zaměřena na odstranění šumu, zmíněn bude tedy pouze šum impulsní, který je v medicínských obrazech nejběžnější [2, 15] a je nutné jej odfiltrovat, aby bylo možné použít metody obsažené v této práci.

#### IMPULSNÍ ŠUM

Impulsní šum, někdy nazývaný také šum typu sůl-pepř, je často následkem defektního snímače nebo neúměrně dlouhé expozici části snímaného tělesa [6]. Je definován jako rozlohou malý region (často pouze jeden pixel), který nabývá hodnot jiných, než mají okolní pixely [2]. Malý region musí být pro každý obraz definován zvlášť, aby nemohlo dojít k tomu, že bude odfiltrován relevantní objekt v obraze. Proces odstranění takových regionů je popsán níže.

#### MEDIÁNOVÝ FILTR, kFILL FILTR

Základní provedení mediánového i kFill filtru využívá masku o velikosti  $3 \times 3$ , která je aplikována na každý pixel v obraze [2]. Při aplikaci dochází k vyplnění masky hodnotami sousedních pixelů, které jsou následně hodnoceny. V případě kFill filtru je na pozici centrálního pixelu vložena hodnota pixelů sousedních v určitých směrech [2, 15], čímž jsou filtrovány především regiony o velikosti 1px.

U mediánového filtru je opět využito zmíněné masky, kde jsou hodnoty seřazeny podle jejich velikosti a na centrální pixel je pak vložena hodnota, která odpovídá hodnotě prostředního prvku po jejich seřazení. Z principu mediánové

filtrace vyplývá, že je tímto způsobem možné filtrovat i regiony s velikostí větší, než je 1 px.

### **1.1.3 DETEKCE REGIONŮ**

Počítač vnímá binární obraz jako plochu pixelů, které jsou definovány hodnotami 1 pro bílou barvu a 0 pro barvu černou. Proces detekce regionů spočívá ve spojení pixelů se stejnými hodnotami do shluků na základě příslušnosti k těmto shlukům. Příslušnost je dána n-spojností či n-okolím, např. 4-spojitosť považuje region za spojený v případě, že se v ortogonálních směrech nachází stejné hodnoty pixelů, 8-spojitosť pak uvažuje stejné hodnoty i pro diagonální směry.

K detekci regionů jsou využívány dvě základní strategie. První z nich je založena na detekci obrysu, tedy pixelů ležících na přechodu mezi pixely s hodnotami 0 a 1. Druhá je založena na identifikaci sousedních pixelů pro každý pixel zvlášť a rozhodnutí, zda jsou pixely součástí stejného shluku. Stejně jako u většiny metod má každá strategie kladné a záporné projevy, je proto nutné strategie pochopit a použít je na příslušná data vhodně.

#### **DETEKCE OBRYSU**

Obrys objektu je definován pixely nacházející se na přechodu mezi bílou barvou, popisující součást regionu, a černou barvou popisující prostor, kde se nenachází žádný příznak obrazu. Jinak řečeno, pixel definující obrys je poslední pixel s hodnotou 1 v daném směru od centroidu objektu.

Detekce obrysu je jednou z esenciálních úprav obrazu, která je potřebná pro určení mnoha deskriptorů. V některých případech zároveň zajišťuje zvýšenou optickou přehlednost v obraze, např. v případě, kdy se v obraze s vysokým rozlišením nachází mnoho malých struktur, které jsou odděleny nepatrnými mezerami.

#### **OBRYSOVÉ TRASOVÁNÍ**

Je založeno na hledání pixelu s hodnotou 1, který leží těsně za pixelem s hodnotou 0 [2, 15]. Pro tuto metodu je nutné předpokládat, že hledání začíná na pixelu s hodnotou 0. Na první nalezený pixel, tedy na první pixel obrysu, je aplikována maska o velikosti  $3 \times 3$ , přičemž centrální pixel masky je umístěn právě na tento pixel. V masce jsou následně zanalyzovány okolní pixely po směru hodinových ručiček a je vybrán první pixel s hodnotou 1, který je následován pixelem 0 [2, 15]. Ten se stává součástí obrysu a zároveň je na něj přesunut centrální pixel masky. Tento postup je opakován v několika dalších iteracích potřebných pro jasnou definici obrysu objektu a je zastaven až v případě, kdy se centrální pixel masky ocitne na pozici, kde byl nalezen první pixel obrysu.



Samotný proces obrysového trasování ovšem tímto nekončí a pokračuje dál, dokud stejným způsobem neobsáhne všechny objekty nacházející se v obrazových datech. Výsledkem jsou tedy jasně definované objekty, respektive jejich obrysy, které byly nalezeny pomocí popsaného postupu.

Případ, kdy jeden objekt obklopuje objekt další, tedy např. terč, jehož střed je obklopen několika kruhy, je nazýván hnízdění. V takových případech je nutné určit, zda je hnízdění žádoucí či nežádoucí efekt v rámci analýzy a upravit podle něj proces obrysového trasování.

## **1.2 TVAROVÁ ANALÝZA**

V posledních několika letech bylo vytvořeno mnoho algoritmů popisujících objekty v obraze. Ve specializovaných oborech existují velmi sofistikované nástroje pro identifikaci abecedních písmen, číslic, znaků a jiných symbolů. [2] Experti jednotlivých oborů se setkávají s tvary, které jejich oboru přísluší, v naprosté většině případů lze ovšem konstatovat, že jde o kombinaci modifikovaných či nemodifikovaných tvarů základnějších, do kterých je možné zařadit kruh, čtverec, trojúhelník a další.

Pro následující text je nutné zavést termín deskriptor. Deskriptor je prvek popisující objekt na základě jeho vlastností, do kterých patří např. obsah (rozloha), obvod, kompaktnost, kulatost, hranatost, úhlovitost a mnohé další [3, 4]. Neméně důležité jsou Fourierovy deskriptory a jiné pokročilé deskriptory popisující tvar v obrazových datech. V této sekci jsou některé deskriptory popsány a je vysvětlena jejich funkce při tvarové analýze.

### **1.2.1 TVAROVÉ DESKRIPTORY 2D OBRAZOVÝCH DAT**

Jakýkoli prvek vyskytující se v objektu může rozhodovat o odlišnosti od objektu jiného, proto je nutné každý takový prvek najít a jasně popsat právě pomocí tvarového deskriptoru. Tvarový deskriptor tedy popisuje prvky vlastní pro jednotlivé objekty, které ho odlišují od objektů jiných.

Kterýkoliv z příznaků objektu (tvaru) může rozhodovat o jeho odlišnosti od objektu jiného, proto je nutné každý takový příznak najít a jasně popsat právě pomocí tvarového deskriptoru. Tvarový deskriptor tedy popisuje příznaky vlastní pro jednotlivé objekty, které ho odlišují od objektů jiných.

#### **GEOMETRICKÉ DESKRIPTORY**

Jedním z nejjednodušších popisů tvarů je za pomoci geometrických deskriptorů. Například obsah (rozloha) je definován počtem pixelů hodnoty 1 v objektu. Hodnota obsahu může posloužit jako ukazatel při určení velikosti objektu [4].

Další z geometrických deskriptorů, kterým je možné do jisté míry odhadnout velikost objektu je obvod. Obvod je suma vzdáleností mezi pixely obrysu, tuto vzdálenost lze spočítat např. pomocí euklidovské vzdálenosti nebo pouhou sumou pixelů s hodnotou 1 nacházejících se v obrysu. Jak již bylo zmíněno, deskriptor obvodu odhaduje velikost objektu pouze do jisté míry – vysoká hodnota obvodu nemusí být nutně spjata s velkou velikostí objektu a naopak [3, 4].

Deskriptor kombinující obvod a obsah je kompaktnost. Je-li dán obvod  $O$  a obsah  $S$ , je kompaktnost definována jako  $C = O^2/4\pi S$  [2]. Nejkompaktnější tvar je kruh, pro který vychází kompaktnost  $C = 1$ . Vyšší hodnota popisuje méně kompaktní tvary. [4]

Do geometrických deskriptorů dále patří kulatost, která je definována za pomoci vzdálenosti obrysových bodů od centroidu objektu. Pro lepší porovnatelnost s ostatními tvary jsou vzdálenosti počítány v jednotlivých úhlech. Kulatost je popsána rovnicí: [4]

$$Kulatost = \sum_{\theta=0}^{\theta=359} \frac{|R_{\theta} - R_p|}{R_p} \quad (3)$$

kde  $\theta$  popisuje směrový úhel,  $R_{\theta}$  vzdálenost bodu obrysu od centroidu pro daný úhel a  $R_p$  průměrnou vzdálenost bodů obrysu od centroidu. Pokud je objekt přesně kruhového tvaru, vychází  $kulatost = 0$ . Vzdálenosti pixelů obrysu od centroidu jsou velmi užitečné i pro výpočet dalších statistických hodnot, mezi které je možné zařadit modus, který je určen nejčastější hodnotou vzdálenosti, dále medián a průměr, které mohou být využity pro určení extrémů v podobě směrodatné odchylky, respektive rozptylu. Všechny zmíněné statistické nástroje mohou přispívat ke správné klasifikaci tvaru.

Poměr stran je dalším z deskriptorů popisujícím rozměry objektu. Ve 2D prostoru je pro stanovení poměru stran nejprve nutné zjistit délku hlavní a vedlejší osy pro příslušný objekt. Poměr stran je pak dán vzorcem: [4]

$$Poměr\ stran = \frac{Délka\ hlavní\ osy}{Délka\ vedlejší\ osy} \quad (4)$$

výsledkem je vždy hodnota vyšší nebo rovna 1.

Úhlovitost je definována jako rozdíl mezi poloměrem objektu v určitém směru a poloměrem odpovídajícím elipse. Pro správnou interpretaci deskriptoru úhlovitosti je nutné předpokládat elipsu o stejném poměru stran, jako má

analyzovaný objekt. Jiný poměr by výrazně znehodnocoval výsledky. Úhlovitost je dána rovnicí: [3]

$$\text{Úhlovitost} = \sum_{\theta=0}^{\theta=359} \frac{|R_{p\theta} - R_{EE\theta}|}{R_{EE\theta}} \quad (5)$$

kde  $\theta$  představuje směrový úhel,  $R_{p\theta}$  poloměr objektu ve směru pod úhlem  $\theta$  a  $R_{EE\theta}$  poloměr odpovídající elipse ve směru pod úhlem  $\theta$ .

Dále je možné popisovat hranatost objektu, která uvádí, jaký je poměr mezi obsahem daného objektu s obsahem nejmenšího možného obdélníku nebo čtverce, který obklopuje zmíněný objekt. Hranatost je popsána pomocí rovnice: [9]

$$\text{Hranatost} = \frac{S_{obj}}{S_{nmo}} \quad (6)$$

kde  $S_{obj}$  představuje obsah analyzovaného objektu a  $S_{nmo}$  obsah nejmenšího možného obdélníku nebo čtverce, který takový objekt celý obklopí.

## 1.2.2 TOPOLOGICKÉ PRVKY

Tvary mohou být charakterizovány pomocí topologických prvků, tedy prvků, které se nemění při elastické deformaci nebo separaci různých regionů v obraze. Pro binární regiony je do topologických prvků možné zařadit: počet děr, popis výčnělků či odsazení. [2, 15]

### ANALÝZA MOMENTU

Analýza momentu představuje systematickou metodu tvarové analýzy. Nejčastěji užívané atributy regionů jsou počítány ze tří momentů s nejnižším řádem. Obsah (rozloha) je dán momentem nultého řádu a reprezentuje počet vnitřních pixelů regionu. Centroid je dán momentem prvního řádu a je umístěn v těžišti daného regionu. Orientace nekulatého regionu je reprezentována hlavními osami, které jsou dány momentem druhého řádu [2].

Informace získané z takové analýzy je možné využít k vyhodnocení centrálních momentů, normalizovaných centrálních momentů a momentových invariant. Těmi je následně možné vyjádřit tvarové příznaky, které jsou nezávislé na poloze regionu, jeho velikosti či orientaci a jsou proto užitečné pro objektové rozpoznávání a klasifikování objektů, u kterých jsou pozice, obsah a orientace irelevantní. [2]

Analýzu momentu je možné provádět na základě vnitřních pixelů regionu, kdy je nutné nejdříve provést procedury upravující vnitřek regionu zmíněné v sekci 1.1.3. Další možností je analýzu provádět na základě obrysu, které musí opět předcházet techniky zmíněné ve stejné sekci.

### GEOMETRICKÉ MOMENTY

Analýza geometrických momentů patří mezi nejpoužívanější a jejich principy jsou často využity k tvarové analýze. Důvodem je snadnější implementace a provedení, než je tomu u jiných, komplexnějších metod.

Geometrické momenty lze definovat jako součin souřadnic pixelů  $x^p y^q$ . Dvoudimenzionální moment řádu  $(p + q)$  pro obraz o velikosti  $N \times M$  je dán rovnicí: [5]

$$m_{pq} = \sum_{y=1}^M \sum_{x=1}^N x^p y^q f(x, y) \quad p, q = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

### DESKRIPTORY VYUŽÍVAJÍCÍ GEOMETRICKÝCH MOMENTŮ

Nejnižší řád momentu  $m_{00}$  prezentuje počet pixelů v regionu, udává tedy jeho obsah (rozlohu). Obsah (rozloha) je deskriptor, který lze využít k porovnání velikostí objektů v obraze, je nutné mít ovšem na paměti, že deskriptor neuvažuje velikost samotného obrazu. Velikost je tedy vždy relativní.

První řád momentu v souřadnicích  $x$  a  $y$ , normalizován podle obsahu, udává přibližné umístění regionu v obraze. Centroidy  $x_c$  a  $y_c$  jsou vypočítány pomocí vzorce: [2]

$$x_c = \frac{m_{10}}{m_{00}} \quad y_c = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (8)$$

Centrální moment  $\mu_{pq}$  pak reprezentuje deskriptor regionu, který je normalizován s přihlédnutím k jeho umístění: [2]

$$\mu_{pq} = \sum_R (x - x_c)^p (y - y_c)^q \quad (9)$$

### 1.2.3 POKROČILÉ METODY TVAROVÉ ANALÝZY

V této sekci budou rozebrány některé z metod tvarové analýzy obrazu využívajících Fourierovu transformaci (FT). Výsledky takové analýzy, která je založena na kvantitativním hodnocení tvarových zkreslení, mohou obsahovat velmi detailní popis tvaru vedoucí k jeho klasifikaci. Fourierovy deskriptory lze rozdělit na deskriptory, které jsou tvořeny pomocí obrysových bodů objektu a na deskriptory, které popisují tvar nejen na základě obrysu, ale i na pixelech, které se nacházejí uvnitř objektu. Je zřejmé, že deskriptory vycházející z obrysu trpí vážným nedostatkem, a to neschopností popsat právě vnitřek objektu. V další části je kladen důraz na dva, asi nejběžnější, deskriptory, kde každý z nich patří do jedné ze zmíněných skupin. [11]

#### JEDNODIMENZIONÁLNÍ FOURIERŮV DESKRIPTOR

Jedno-dimenzionální fourierův deskriptor (dále jen 1D-FD) je základní deskriptor využívající fourierovu transformaci (dále jen FT). Jak již bylo zmíněno výše, jeho nedostatkem je základní princip metody, která využívá pouze bodů z obrysu objektu. I přes to je 1D-FD oblíbený a používaný deskriptor. [13, 14] Výhody 1D-FD metody tkví v možnosti snadné derivace, normalizace, odolnosti proti šumu, snadné charakterizaci (přiřazování výsledků ke známým datům) a mnoha dalších [13, 14, 7]. Pro realizaci 1D-FD je využito znalosti vzdálenosti obrysových bodů od centroidu  $x_c, y_c$  objektu.

Ten je vypočítán následovně: [7]

$$r_t = \sqrt{(x(t) - x_c)^2 + (y(t) - y_c)^2} \quad (10)$$

kde

$$x_c = \frac{1}{2} \sum_{t=0}^{N-1} x(t) \quad y_c = \frac{1}{2} \sum_{t=0}^{N-1} y(t) \quad (11)$$

1D-FT je poté aplikována na  $r(t)$  k získání 1D-FD:

$$x_c = \frac{1}{2} \sum_{t=0}^{N-1} r(t) \exp \frac{-j2\pi nt}{N} \quad (12)$$

Takto získaný deskriptor často popisuje tvary lépe než jiné deskriptory vycházející z obrysových bodů. [7] Dále je nutné zmínit, že k provedení takových výpočtů je nutná znalost obrysových bodů, které je, v některých případech, složité nebo zcela

nemožné definovat. Jako extrémní příklad objektu, u kterého nelze správně definovat obrys, je možné uvést následující obrázek:



Obr. 1: Obrázek se nedefinovatelným obrysem, zdroj: [7]

Naopak, pokud je obrys jasně definován, je možné 1D-FD použít a získat tak cenný deskriptor. Je vhodné zmínit, že je Fourierova transformace při správném použití reverzibilní – ze získaného deskriptoru lze inverzní Fourierovou transformací získat původní obraz. 1D-FD je demonstrována v kapitole řešení studentské práce.

### ZERNIKŮV MOMENTOVÝ DESKRIPTOR

Problémy, s nimiž se potýká 1D-FD řeší *zernikovy momentové deskriptory* (dále pouze ZMD). ZMD je počítán z hodnot všech pixelů objektu, nejen z jeho obrysu. Pro tuto práci byl ZMD vybrán také z důvodu, že je považován za jeden z nejkvalitnějších deskriptorů v rámci celkových výsledků v porovnání s deskriptory jinými, např. legendrovy momenty, pseudo-zernikovy momenty a další. [12] Výborné výsledky ZMD pochází z jeho vlastností mezi které je možné zařadit: rotační invariance, odolnost proti šumu, rychlá realizace metody a další. S použitím správné normalizační metody je možné dosáhnout také škálovatelnosti. [10]

ZMD je získán pomocí zernikových polynomů. V polárním prostoru  $(\rho, \theta)$  jsou polynomy  $R_{nm}(\rho)$  definovány: [7,10]

$$R_{nm}(r) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)! \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)!} \rho^{n-2s} \quad (13)$$







Kde  $r$  je vzdálenost bodu od ceontroidu,  $n$  je kladné číslo a  $m$  nenulové číslo. Tyto čísla dále podléhají následujícím podmínkám:  $n - |m| = \text{sudé číslo}$  a  $|m| \ll n$ . Řád  $(n, m)$  základní zernikovy funkce  $V_{nm}(\rho, \theta)$  je dán: [12,10]

$$V_{nm}(\rho, \theta) = R_{nm}(\rho) \exp(jm\theta), \quad \rho \ll 1 \quad (14)$$

Konečně, zernikův moment je definován: [12, 10, 7]

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \int \int V_{nm}^*(\rho, \theta) f(\rho, \theta) \quad (15)$$

kde  $V_{nm}^*$  je  $V_{nm}$  v komplexní rovině. Příklad výsledků ZMD řádu  $n = 4$ ,  $m = 2$  je znázorněn na následujícím obrázku:

<p>Horizontal oval</p>  <p><math>z = 0.092942</math> <math>\phi_i = -179.92</math></p>	<p>-45° oval</p>  <p><math>z = 0.090255</math> <math>\phi_i = -89.9094</math></p>	<p>Vertical oval</p>  <p><math>z = 0.092942</math> <math>\phi_i = 0.079697</math></p>
<p>Horizontal shape</p>  <p><math>z = 0.06855</math> <math>\phi_i = 110.4494</math></p>	<p>Vertical shape</p>  <p><math>z = 0.06885</math> <math>\phi_i = -69.5508</math></p>	<p>Horizontal rectangle</p>  <p><math>z = 0.14797</math> <math>\phi_i = -179.9256</math></p>

Obr. 2: Zernikovy momenty pro různé tvary a jejich rotaci,  $n = 4$ ,  $m = 2$ , zdroj: [14]

## DALŠÍ TVAROVÉ DESKRIPTORY

Tato práce se zaměřuje na deskriptory, které byly popsány výše, nicméně je pro úplnost nutné zmínit, že tvarových deskriptorů je celá řada. Mezi ty nejpoužívanější, které zmíněny nebyly, patří:

- Deskriptory založené na hraničním zakřivení
- Deskriptory vycházející z fraktální analýzy
- Vlnkové deskriptory
- Deskriptory založené na tzv. korespondenci

### 1.2.4 DESKRIPTORY 3D OBRAZOVÝCH DAT

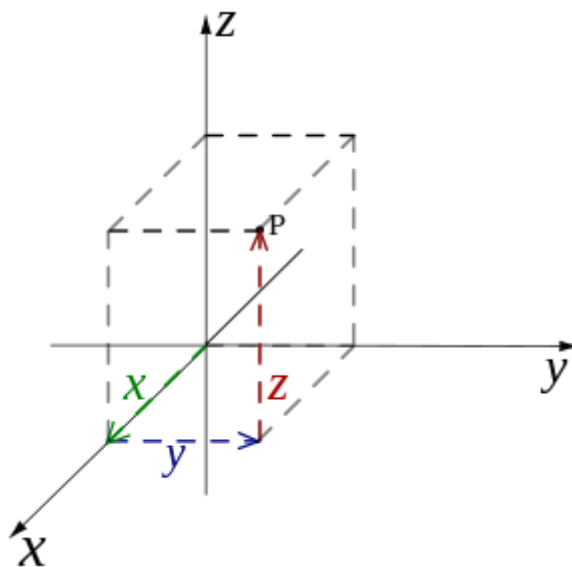
V dnešní době jsou běžně využívány diagnostické metody, které poskytují obraz ve třech a čtyřech dimenzích, kde třetí dimenze představuje hloubku obrazu a čtvrtá čas. Je ovšem vhodné si uvědomit, že trojrozměrný obraz je v naprosté většině získáván pomocí zpracování jednotlivých řezů snímaného tělesa. Jako příklad může posloužit výpočetní tomografie (dále jen CT). Jedná se o metodu, která využívá více než sto let známé roentgenovo záření, ale změnil se přístup k pořizování snímků. CT pořizuje snímky v různých rovinách a krocích, které se následně zpracují tak, aby byl vytvořen 3D obraz. Je tedy zřejmé, že deskriptory, které byly využity pro 2D obrazy lze, při správné aplikaci, použít i na obrazy ve 3D provedení.

Jako deskriptor popisující obraz ve třech dimenzích je možné uvést objem. Objem je možné definovat jako sumu všech hodnot 1 uvnitř daného objektu, jedná se tedy o sumu obsahů pro každý řez.

$$Objem = \sum_0^M Obsah \quad (16)$$

kde  $M$  je počet řezů.

Dále, stejně jako u 2D obrazů, lze počítat vzdálenost jednotlivých bodů obrysu od centroidu. V případě 2D obrazů je optimální, aby byly zmíněné vzdálenosti počítány pro jednotlivé úhly, viz sekce 1.2.1. Pro 3D obrazy lze využít stejné myšlenky. Rozdíl je v tom, že tato myšlenka musí být aplikována dvakrát, poprvé pro vzdálenost v rovině XY a podruhé v rovině v XZ.



Obr. 3: Kartézská soustava pro 3D prostor



## OBRYŠ 3D OBJEKTŮ

U tvorby obrysů 3D objektů bylo využito znalosti, která byla popsána výše, a tedy, že 3D obraz je tvořen jednotlivými řezy tvořenými 2D obrazy. Na každý z řezů je aplikován proces obrysového trasování ze sekce 1.1.3 a získán tak jejich obrys. V případě prvního a posledního řezu je nutné vyplnit vnitřky obrysu hodnotou 1, aby byl 3D objekt uzavřen ze všech stran.

## VZDÁLENOSTI BODŮ OD OBRYSU

Stejně jako u 2D obrazových dat je možné vypočítat vzdálenost jednotlivých bodů obrysu od centroidu. V případě 3D je ovšem proces složitější a je nutné brát v úvahu dva úhly – úhel  $\varphi$  a elevační úhel  $\theta$ , které jsou počítány pomocí vzorců: [18, 19]

$$\varphi = \arctan \frac{y}{x} \quad (17)$$

$$\theta = \arccos \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (18)$$

kde  $x, y, z$  představují pozici pixelu v dané rovině. Elevační úhel  $\theta$  nabývá hodnot  $(-89, 90)$ , zatímco úhel  $\varphi$  nabývá hodnot  $(0, 359)$ . Výsledek se tedy dá interpretovat maticí (tabulkou) o velikosti  $180 \times 360$ , která obsahuje vzdálenosti bodů obrysu v daných úhlech.

## 1.3 KLASIFIKACE OBRAZOVÝCH DAT

Tvarová analýza vede, v optimálním případě, ke klasifikaci obrazových dat ve stejné kvalitě, jako by analýzu provedl expert v daném oboru. Je nutné si uvědomit, že analýza prováděna expertem se ve většině případech nezakládá na různých deskriptorech, ale spíše na jeho zkušenostech s klasifikovaným objektem.

Naopak, zautomatizovaná klasifikace obrazových dat je založena právě na deskriptorech, které byly popsány skrze tuto práci a mnoha dalších metodách, které jsou pro člověka těžko definované „od oka“. Příkladem klasifikace obrazových dat může být Hammingova síť, která může využívat binární logiku nebo fuzzy logiku [1] nebo Hopfieldova síť [1].

### HAMMINGOVA SÍŤ

Jedná se o umělou neuronovou síť, která není založena na deskriptorech zmíněných v předchozích sekcích, nýbrž na podobnosti analyzovaných objektů s objekty referenčními. K určení podobnosti je využito tzv. Hammingovy vzdálenosti, která je

založena na znalosti hodnoty daného pixelu  $x(i, j)$  u obrazu referenčního a porovnání této hodnoty s pixelem analyzovaným  $x_2(i, j)$ .

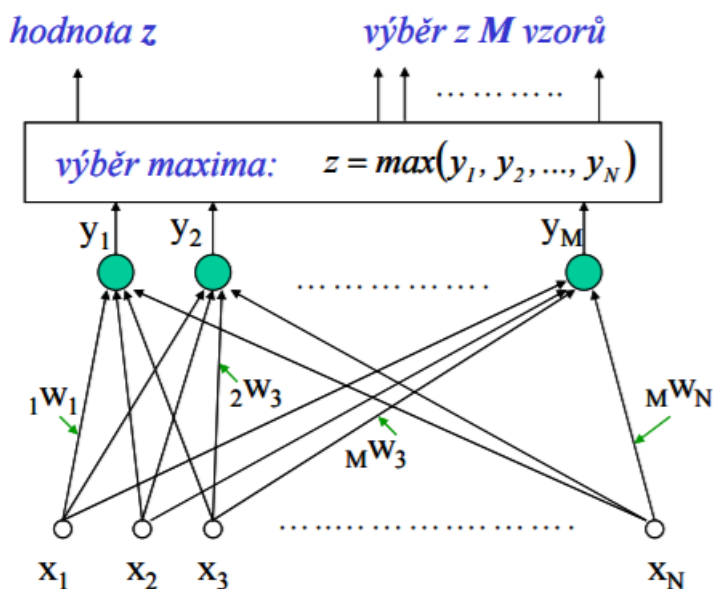
Tento postup je aplikován na celý obraz:

$$\text{Hammingova vzdálenost} = \sum_i^N \sum_j^M |x(i, j) - x_2(i, j)| \quad (19)$$

kde  $M$  označuje velikost obrazu v horizontálním směru,  $N$  pak velikost ve vertikálním směru,  $x$  značí referenční obraz a  $x_2$  obraz analyzovaný. Výsledkem je tedy hodnota rozdílu, která popisuje podobu obou tvarů. Čím vyšší rozdíl, tím samozřejmě nižší podobnost obrazů. Samotnou klasifikaci je možné dělit na binární a fuzzy.

Binární klasifikace je jednoduché zařazení analyzovaného objektu do skupiny (shluku), která jej nejlépe popisuje, rozdíl je tedy v rámci analýzy nejmenší a podobnost největší. Fuzzy logika řadí objekty do skupin (shluků) podle hodnot podobnosti analyzovaného objektu, které jsou dány jejich poměrem.

Při pohledu na výpočet je zřejmé, že hammingova síť předpokládá dva stejně velké obrazy, což může být v mnoha případech výrazná nevýhoda, která by se dala řešit zmenšením, respektive zvětšením, jednoho z obrazů, tím ovšem dochází ke ztrátě kvality jednoho z obrazů.



Obr. 4: Hammingova síť,  $x$  - vstupy,  $y$  - výstupy,  $w$  - váhy, zdroj: [1]

## HOPFIELDOVA SÍŤ

Hopfieldova síť je jednovrstvá síť tvořená neurony, jejichž počet odpovídá počtu vstupů. Výstup každého neuronu je veden na vstup neuronu dalšího s váhou  $w_{i,j}$ , čímž vzniká diagonálně symetrická matice vah s vahami  $w_{ii} = 0$  [1]. Samotný výpočet využívá *energetické funkce*, kterou na začátku osmdesátých let navrhl John Hopfield a jeho tým.

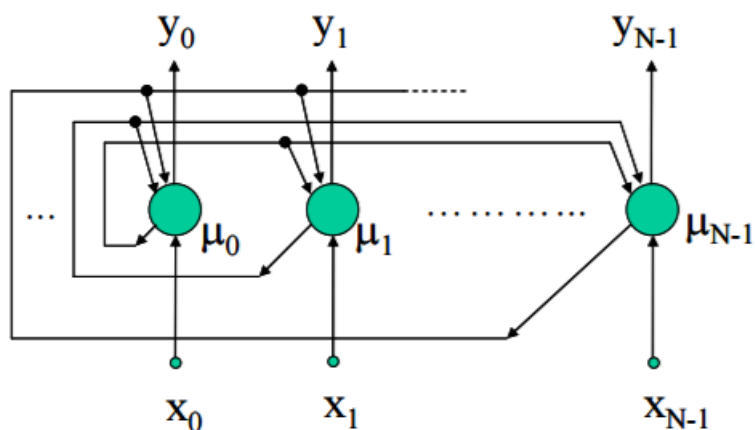
Energie i-tého neuronu je počítána vzorcem: [1]

$$E_i = -\mu_i \alpha_i = -\mu_i \left( \sum_j w_{ij} \mu_j \right) \quad (20)$$

Energie celé sítě pak: [1]

$$E = -\sum_i E_i = -\sum_i -\mu_i \alpha_i = -\sum_i -\mu_i \left( \sum_j w_{ij} \mu_j \right) = -\sum_i \sum_j w_{ij} \mu_i \mu_j \quad (21)$$

Zásadní skutečností je, že energie neuronu se může pouze snižovat nebo zůstat stejná.



Obr. 5: Hopfieldova síť, x - vstupy, y - výstupy,  $\mu$  - neurony, zdroj: [1]

## 2 ŘEŠENÍ STUDENTSKÉ PRÁCE

V kapitole řešení studentské práce jsou navrženy postupy, které využívají znalostí z kapitoly teorie a které vedou k tvarové analýze obrazových dat. Pro výpočty samotných deskriptorů byly vytvořeny funkce v jazyce MATLAB, který byl zvolen hlavně z důvodu jeho nativní podpory pro zpracování obrazových dat a z důvodu široké komunity, která jazyk MATLAB využívá pro práci s biomedicínskými daty.

V první sekci této kapitoly budou prezentovány postupy vedoucí k tvarové analýze založené na znalostech z kapitoly teorie. Metody jsou následně aplikovány na generovaná data v sekci druhé. V třetí sekci této kapitoly jsou metody použity i na reálná data. V poslední sekci je prezentováno generování 3D obrazů, které jsou opět popsány deskriptory, které byly definovány v kapitole teorie v sekci 1.2.4.

### 2.1 REALIZACE METOD TVAROVÉ ANALÝZY

Příprava obrazu postupuje podle metod popsaných v části teorie, dochází tedy k převodu z šedotónové reprezentace do černobílé (binární) reprezentace obrazu pomocí prahování – původní šedotónový obraz je procházen pixel po pixelu, kdy v každém daném pixelu je jeho hodnota porovnávána s hodnotou nastaveného prahu. Pokud je hodnota pixelu vyšší, než je hodnota prahu, je daný pixel klasifikován jako bílý – má hodnotu 1 v binárním obraze. V opačném případě je pixel černý a jeho hodnota je 0.

Je nutné dodat, že je v případě této práce využito globálního prahování, které s sebou nese mnohé nevýhody. Pravděpodobně největší nevýhodou je neschopnost použité metody binarizovat více úrovní šedotónového obrazu. Úroveň je v tomto kontextu definována jako rozsah hodnot, které definují objekty v obrazových datech. Pokud se v obraze nachází více takových úrovní, např. při zvýšené expozici části obrazu, je zcela možné, že budou některé důležité prvky obrazu zcela ignorovány. V takových případech je výhodnější využít prahování lokálního, které je, jak z názvu vyplývá, ovlivňováno pouze hodnotami pixelů v zadaném rozsahu okolo centrálního pixelu. Tato práce ovšem není zaměřena na úpravu samotného obrazu a využívá proto již zmíněného, mnohem jednoduššího, globálního prahování, které je zprostředkováno nativní funkcí MATLABU – *graythresh*.

#### ODSTRANĚNÍ ŠUMU A MALÝCH OBJEKTŮ

Jak bylo zmíněno v části teoretické, práce se zabývá odstraněním pouze šumu impulsního. K tomu je využit následující postup. Odstranění impulsního šumu využívá funkce *bwareaopen* z toolboxu image processing [8], která využívá principů kFill filtru, který je popsán v kapitole 1.1.2. Jedná se tedy o postup, který je zaměřen čistě na náhodný impulsní šum. Pro odstranění malých objektů se využívá informací,

kteřé byly zjištěny pomocí funkce *bwconncomp*, které se bude blíže věnovat další sekce. Nicméně, princip je možné vysvětlit ihned - pokud je nalezený region pomocí zmíněné funkce větší než nastavitelný práh, je region považován za příznak obrazu, v opačném případě je region odfiltrován.

### 2.1.1 DETEKCE REGIONŮ

K detekci regionů je využito funkce *bwconncomp* z toolboxu *image processing*. [8] Funkce rozdělí pixely v obraze do jednotlivých shluků (regionů) na základě jejich propojenosti se sousedními pixely. Hodnota propojenost = 8 tedy představuje pixel, který je zcela obklopen pixely se stejnou hodnotou, jakou má on sám. Výstup funkce pak představuje počet regionů v obraze a souřadnice pixelů, které do nich patří - toho je využito v tvorbě zdroj. kódu u výše zmíněného postupu odstranění šumu.

#### ZÍSKÁNÍ OBRYSU

K získání obrysu bylo využito postupu popsaného v teoretické části v kapitole 1.1.4. Vlastnosti obrysu jsou velmi důležité pro tvarovou analýzu obrazových dat, protože jsou na něm založeny mnohé deskriptory. Zároveň je obrys relativně dobrým prostředkem pro zvýšení přehlednosti v některých typech obrazů - převážně tedy obrazy s velkým rozlišením, ve kterých jsou některé regiony rozděleny jen nepatrnými mezerami.

#### OBRYS A VEKTOR OBRYSU

Termín vektor obrysu je v práci použit jako definice směru sousedních pixelů v obrysu. Pro nalezení obrysu byla využita alternace metody obrysového trasování popsaného v kapitole 1.1.4. Masku se tedy nepohybuje pouze po obrysových bodech, ale dochází zároveň k zaznamenávání směru pohybu. K tomu je využita pomocná matice.

Při pohybu masky po jednotlivých pixelech obrysu je směr zapsán pomocí pomocné matice, která má následující rozložení:

Tab. 1: Pomocná matice

1	4	7
2	5	8
3	6	9

Při každém pohybu je nastavena priorita směrů, s jakým se má matice dále přemísťovat. Priorita je určena podle posledního pohybu matice a faktem, že jde o obrysové trasování po směru hodinových ručiček.

## DETEKCE HRAN

Pro tuto práci byla vytvořena funkce *hrany(obrys, vektor\_obrysu)*, která je schopná detekovat jednotlivé hrany a určit jejich délku. K tomu jsou využity znalosti o obrysu a vektoru obrysu zmíněného výše, které jsou zároveň vstupními hodnotami funkce.

Algoritmus pracuje tak, že je vytvořena maska o rozměrech  $1 \times 7$ , která je naplněna hodnotami vektorů obrysu. Rozměry masky jsou zvoleny po dostatečném otestování funkčnosti. Dále je určen modus hodnot v masce, to z důvodu, že v mnoha případech je hrana orientovaná pod úhlem  $\alpha$ , což způsobí, že je hrana tvořena více než jednou hodnotou vektoru obrysu. Modus tedy vezme nejčastější hodnotu v masce a dále s ní pracuje.

Dále je nastaven práh, který definuje minimální velikost hrany, ten může být pro každý obraz, potažmo objekt nastaven zvlášť. Pokud je velikost hrany větší než práh, hrana je registrována a její velikost je uložena do proměnné.

## PŘÍZPŮSOBENÍ OBRAZŮ KE KLASIFIKACI

Jednotlivé biomedicínské obrazy byly poskytnuty v rozdílných rozlišeních, což by znamenalo významný problém v sekci 1.2.1. Proto je potřeba obrazy přizpůsobit zvolené velikosti, v případě této práce velikosti největšího z analyzovaných obrazů.

Toho bylo docíleno tak, že se obraz nejdříve vycentroval na analyzovaný objekt, který byl následně vyříznut z obrazu. K vyříznutému obrazu byly po všech jeho stranách vloženy dostatečně velké matice s hodnotami 0 tak, aby měl obraz ve výsledku stejné rozměry jako největší analyzovaný obraz.

### 2.1.2 ZÍSKÁNÍ DESKRIPTORŮ

V této sekci jsou popsány procesy a algoritmy, které vedou k určení vybraných deskriptorů.

#### GEOMETRICKÉ DESKRIPTORY

Část geometrických deskriptorů je získaných pomocí funkce *regionprops*, která je součástí toolboxu *image processing* [8], další část deskriptorů je popsána pomocí vlastních funkcí. Do deskriptorů získaných za pomoci *regionprops* patří: obvod, orientace, délky hlavních a vedlejších os. Do deskriptorů získaných pomocí vlastních funkcí, které vycházejí z rovnic a popisů z kapitoly Teoretická část, patří: kulovitost, hranatost, kompaktnost, obsah, centroidy, vektorové směry hran a minimální, maximální a průměrná vzdálenost obrysových bodů od centroidu. Pro výpočet vlastních deskriptorů byly využity vzorce popsané v kapitole teorie v sekci 1.2. Samotný algoritmus je uveden v příloze.

## FOURIEROVY DESKRIPTORY

Pro popis tvarů pomocí metod využívající FT bylo zapotřebí správné znalosti obrysu a vzdáleností mezi jednotlivými body obrysu a centroidem objektu. Pro objektivní porovnání těchto vzdáleností mezi jednotlivými objekty je zároveň nutné vzdálenosti vypočítat ne pro jednotlivé body, ale spíše pro úhel. K tomu byla vytvořena funkce *vzdalenostOdCentroidu(obrys, centroidy)*, která má na vstupu obrys a centroidy objektu. Na výstup této funkce je poté aplikována FT, jejímž výsledkem je 1D-FD. Další z deskriptorů popsaných v sekci 1.2.3 byly zernikovy momenty. Pro výpočet těchto momentů bylo využito funkce *zernikeMoments(obj)*, která byla naprogramována panem Amir Tahmasbiem. [15]

## 2.2 GENEROVÁNÍ ZÁKLADNÍCH 2D OBRAZŮ

Do základních 2D tvarů tato práce zařazuje čtverec, trojúhelník, obdélník, kosočtverec a mnohoúhelník. Ke generování těchto tvarů byly vytvořeny funkce, které mají na vstupu rozměry zvoleného tvaru. Nejjednodušším příkladem je čtverec, který na vstupu bere velikost hrany *a*. Protože generované objekty slouží jako reference k reálným datům, funkce byly navrženy tak, aby byly jednotlivé objekty škálovatelné podle potřeb. Speciální případ představuje mnohoúhelník.

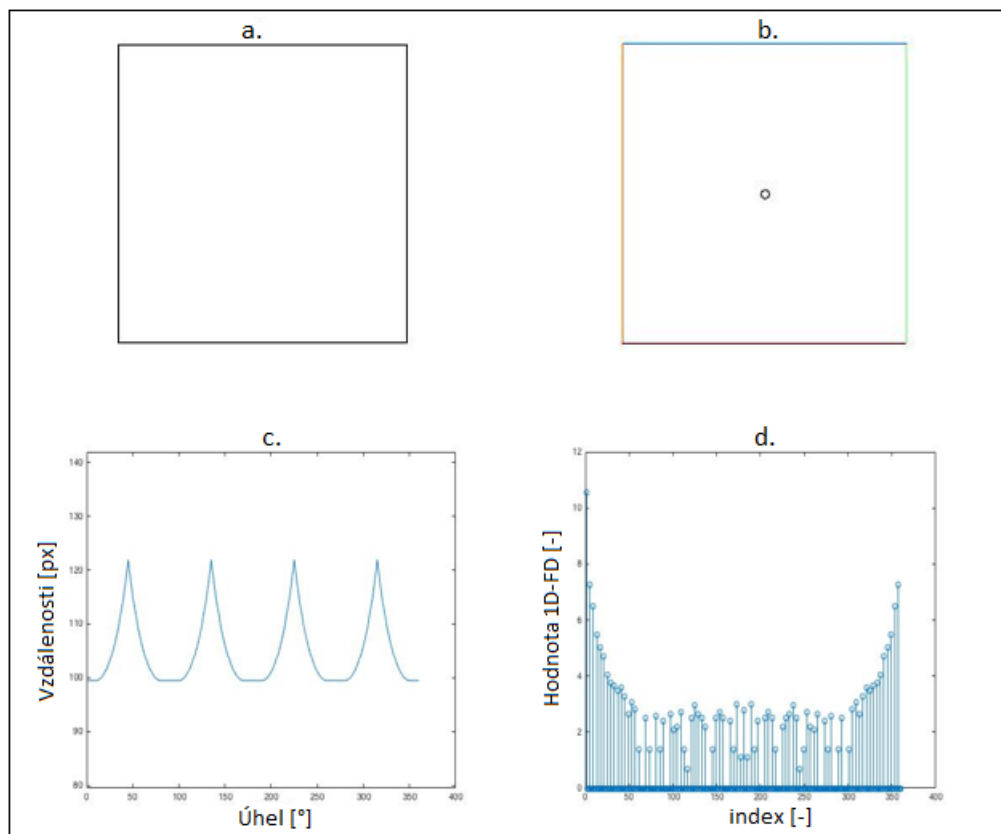
Za mnohoúhelník by se daly považovat všechny zmíněné tvary, i jakékoliv jiné tvary v 2D prostoru, proto byla navržena funkce, která generuje uživatelem zadaný tvar přesně podle jeho potřeb. Vstup funkce bere počet vrcholů mnohoúhelníku a velikost obrazu, tedy jeho rozlišení v pixelech. Uživatel pak myší definuje body ve vygenerovaném okně, které se nakonec propojí a vytvoří tak mnohoúhelník.

V každé podsekci, která je věnovaná každému tvaru, je možné vidět: a. vygenerovaný objekt pomocí vlastních funkcí, b. obrys generovaného tvaru, kde jsou barevně znázorněny vektory hran a bodem vyznačen centroid objektu, c. graf popisující vzdálenosti bodů obrysu od centroidu vygenerovaného objektu a d. 1D-FD popsaný v sekci 1.2.4. Dále jsou u každého tvaru v první tabulce uvedeny hodnoty geometrických deskriptorů a v poslední řadě, pro jednu z prezentací daného objektu byla vytvořena tabulka zernikových momentů. Pro každý tvar byly vygenerovány dvě jejich prezentace tak, aby bylo možné je v další sekci porovnat na základě znalostí jednotlivých deskriptorů.

Tato sekce může zároveň sloužit jako mechanismus ke zjištění různých nepřesností nebo chyb v použitých procesech získávání deskriptorů, protože vygenerované tvary jsou jasně definovány a jejich deskriptory jsou předem známé. Tyto nedostatky budou diskutovány v kapitole Závěr.

## ČTVEREC

Mezi nejjednodušší tvary patří bezesporu čtverec. Generování čtverce je v práci realizováno funkcí  $VytvorCtverec(a)$ , která má na vstupu velikost hrany  $a$ .



Obr. 6: Generování a popis čtverce - a. čtverec vygenerovaný pomocí funkce  $VytvorCtverec(200)$  b. obrys generovaného čtverce, c. vzd. bodů obrysu od centroidu, d. 1D-FD generovaného tvaru

Tab. 2: Geometrické deskriptory čtverce

	Ctverec(200)	Ctverec(234)
Obsah	40000	54756
Obvod	779,72	913
Orientace	0	0
Délka hl. osy	230,9	270,2
Délka Vedl. osy	230,9	270,2
Centroidy	102,50 102,50	119,50 119,50
Kulatost	18,4	18,4
Hranatost	1	1
Kompaktnost	1,2	1,2
Počet hran	4	4
Délky hran	199 199 199 199	233 233 233 233
Min vzd. od C	99,5	116,5
Max vzd. od C	121,9	142,8
Prům. vzd. od C	104,9	122,9

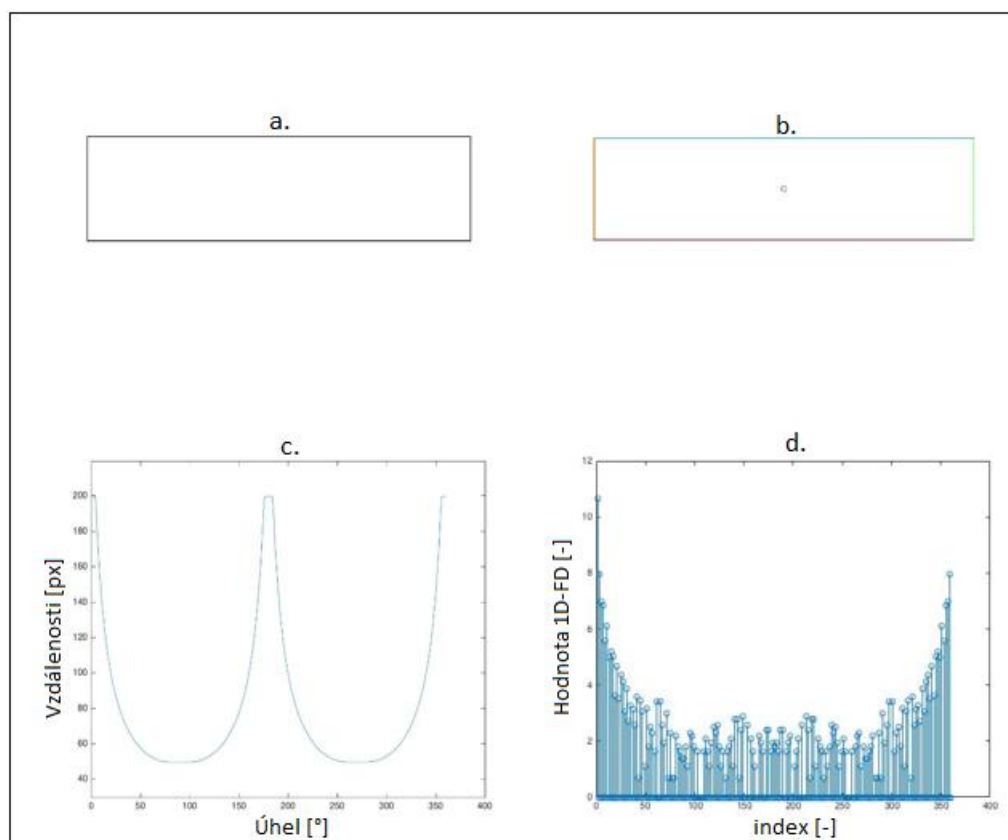


**Tab. 3: Zernikovy momenty pro čtverec(234)**

m,n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	7,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,76	-	1,46	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	2,20	-	3,58	-	-	-	-	-	-	-
4	1,25	-	2,09	-	0,00	-	-	-	-	-	-
5	-	4,62	-	6,17	-	1,05	-	-	-	-	-
6	1,78	-	4,20	-	0,00	-	1,04	-	-	-	-
7	-	2,20	-	2,98	-	5,84	-	1,34	-	-	-
8	2,26	-	2,12	-	0,01	-	1,44	-	0,01	-	-
9	-	2,54	-	5,29	-	6,17	-	1,57	-	4,12	-
10	2,80	-	1,01	-	0,01	-	3,26	-	0,01	-	4,58

## OBDÉLNÍK

Další ze základních tvarů je obdélník. Pro jeho generování byla vytvořena funkce *VytvorObdelnik(a,b)*, která bere jako vstupní hodnoty výšku *a* a šířku *b*.



**Obr. 7: Generování a popis obdélníku - a. obdélník vygenerovaný pomocí funkce *VytvorObdelnik(100,400)*, b. obrys generovaného obdélníku, c. vzd. bodů obrysu od centroidu, d. 1D-FD generovaného tvaru**

**Tab. 4: Geometrické deskriptory pro obdélník**

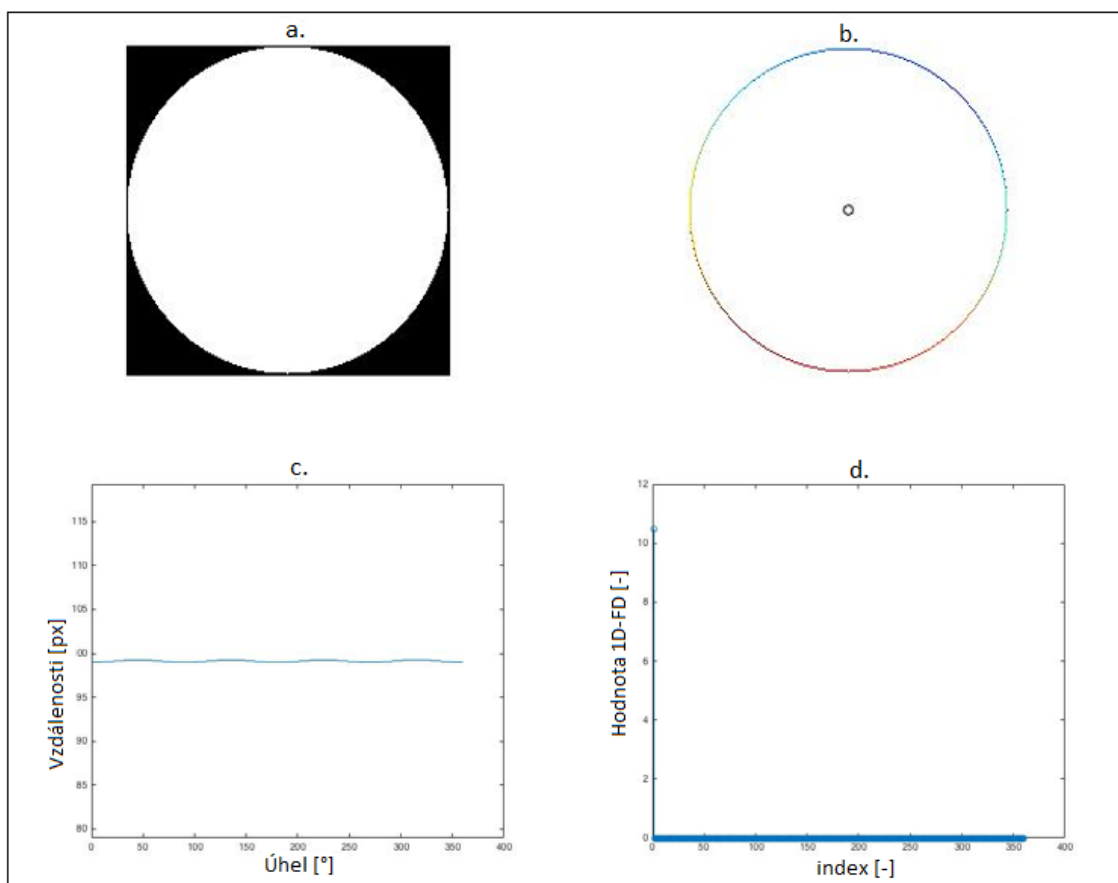
	Obdelnik(100,400)	Obdelnik(123,234)
Obsah	40000	28782
Obvod	975,72	695,44
Orientace	0	0
Délka hl. osy	461,9	270,2
Délka vedl. osy	115,5	142
Centroidy	202,50 52,50	119,50 64,00
Kulatost	146	88
Hranatost	1	1
Kompaktnost	1,9	1,3
Počet hran	4	4
Délky hran	99 399 99 399	122 233 122 233
Min vzd. od C	49,5	61
Max vzd. od C	199,5	118,7
Prům. vzd. od C	80,7	84

**Tab. 5: Zernikovy momenty pro obdélník(100,400)**

m,n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1,23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,73	-	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	0,01	-	0,01	-	-	-	-	-	-	-
4	1,18	-	0,01	-	0,02	-	-	-	-	-	-
5	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	-	-	-	-
6	1,69	-	0,01	-	0,03	-	0,01	-	-	-	-
7	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	-	-
8	2,13	-	0,01	-	0,04	-	0,01	-	0,03	-	-
9	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-
10	2,65	-	0,01	-	0,04	-	0,01	-	0,04	-	0,01

## KRUH

Pro generování kruhu byla vytvořena funkce *VytvorKruh(d)*. Do funkce vstupuje hodnota  $d$  reprezentující průměr kruhu. Algoritmus je založen na výpočtu euklidovských vzdáleností od středu kruhu. Pokud je eukl. vzdálenost menší než  $d/2$ , pak je pixel součástí kruhu a vyznačen hodnotou 1, v opačném případě je hodnota pixelu 0.



Obr. 8: Generování a popis kruhu - a. kruh vygenerovaný pomocí funkce VytvorKruh(201). obrys generovaného kruhu, c. vzd. bodů obrysu od centroidu, d. 1D-FD generovaného tvaru

Tab. 6: Geometrické deskriptory pro kruh

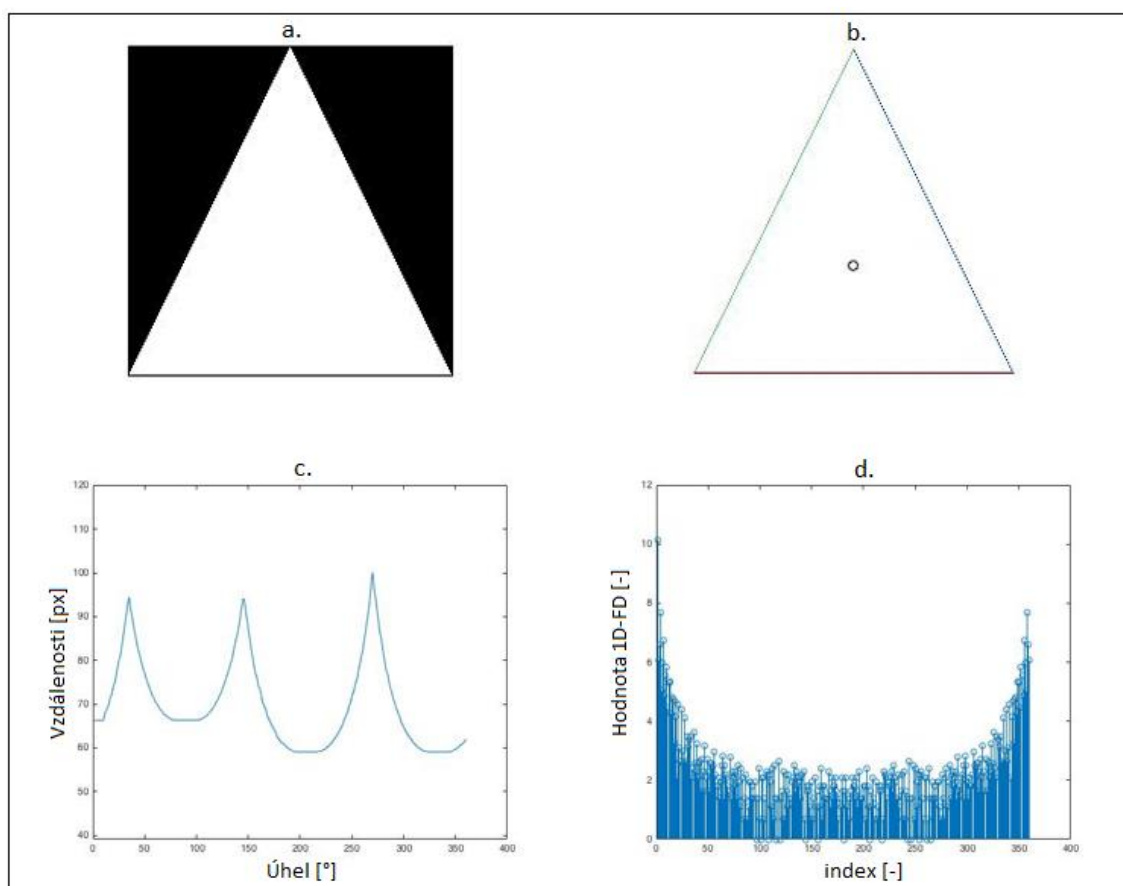
	Kruh(200)	Kruh(226)
Obsah	31415	40087
Obvod	625,71	706,99
Orientace	45	45
Délka hl. osy	200	225,9
Délka Vedl. osy	200	225,9
Centroidy	102,00 102,00	115,00 115,00
Kulatost	0,3	0,2
Hranatost	0,8	0,8
Kompaktnost	1	1
Počet hran	9	9
Délky hran	64 73 90 ...	70 84 100 ...
Min vzd. od C	99	112
Max vzd. od C	99,3	112,2
Prům. vzd. od C	99,1	112,1

**Tab. 7: Zernikovy momenty pro kruh(226)**

m,n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,06	-	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	0,03	-	0,00	-	-	-	-	-	-	-
4	0,09	-	0,00	-	0,00	-	-	-	-	-	-
5	-	0,03	-	0,00	-	0,00	-	-	-	-	-
6	0,12	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	-	-	-
7	-	0,04	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	-	-
8	0,14	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,01	-	-
9	-	0,04	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-
10	0,15	-	0,01	-	0,00	-	0,00	-	0,01	-	0,00

## TROJÚHELNÍK

Trojúhelník je generován funkcí *VytvorTrojuhelnik([rozmetry])*, která má jako vstupní hodnoty velikost podstavy a ramen ve formátu *[podstava rameno1 rameno2]*. Generování využívá velmi podobného principu jako kruh, tedy vzdáleností pixelů od bodů, kde body (vrcholy) podstavy jsou známé a třetí bod (vrchol) je místo, kde se protínají kruhy o velikosti ramen.



**Obr. 9: Generování a popis trojúhelníku - a. trojúhelník vygenerovaný pomocí funkce *VytvorTrojuhelnik([200 224 224])*, b. obrys generovaného trojúhelníku, c. vzd. bodů obrysu od centroidu, d. 1D-FD generovaného tvaru**

**Tab. 8: Geometrické deskriptory pro trojúhelník**

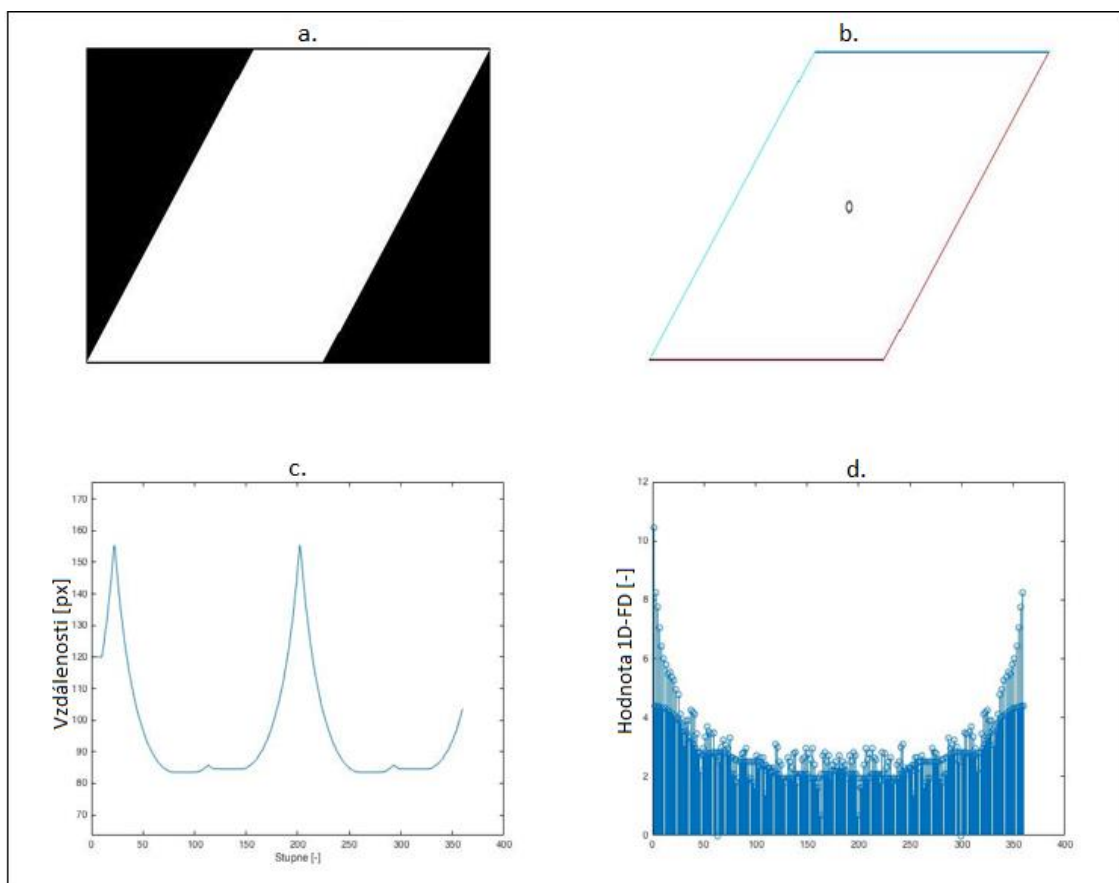
	Trojuhelnik([200 224 224])	Trojuhelnik([304 304 304])
Obsah	20100	40127
Obvod	633,53	897,73
Orientace	-90	1,5
Délka hl. osy	189	248,7
Délka vedl. osy	163,7	248,4
Centroidy	102,25 135,67	154,10 177,67
Kulatost	42,4	41,1
Hranatost	0,5	0,5
Kompaktnost	1,6	1,6
Počet hran	3	3
Délky hran	201 282 194	304 370 367
Min vzd. od C	59,1	87,1
Max vzd. od C	100,1	136,6
Prům. vzd. od C	69,9	99,2

**Tab. 9: Zernikovy momenty pro trojúhelník(304 304 304)**

m,n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	0,27	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,65	-	0,24	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	0,02	-	0,05	-	-	-	-	-	-	-
4	0,59	-	0,12	-	0,06	-	-	-	-	-	-
5	-	0,08	-	0,17	-	0,13	-	-	-	-	-
6	0,57	-	0,01	-	0,00	-	0,00	-	-	-	-
7	-	0,05	-	0,13	-	0,09	-	0,01	-	-	-
8	0,61	-	0,06	-	0,03	-	0,10	-	0,08	-	-
9	-	0,01	-	0,01	-	0,02	-	0,01	-	0,01	-
10	0,79	-	0,06	-	0,03	-	0,09	-	0,09	-	0,00

## KOSOČTVEREC

Pro generování kosočtverce byla vytvořena funkce *VytvorKosoctverec(hrana, uhel)*, kde vstupní hodnoty představují velikost hrany a směrový úhel kosočtverce. Kosočtverec je tvar, který je tvořen dvěma stejnými, pravoúhlými trojúhelníky a obdélníkem. S takovou znalostí bylo také přistupováno k samotné tvorbě algoritmu generování kosočtverce.



**Obr. 10: Generování a popis kosočtverce - a. kosočtverec vygenerovaný pomocí funkce VytvorKosoctverec(200,60), b. obrys generovaného kosočtverce, c. vzd. bodů obrysu od centroidu, d. 1D-FD generovaného tvaru**

**Tab. 10: Geometrické deskriptory pro kosočtverec**

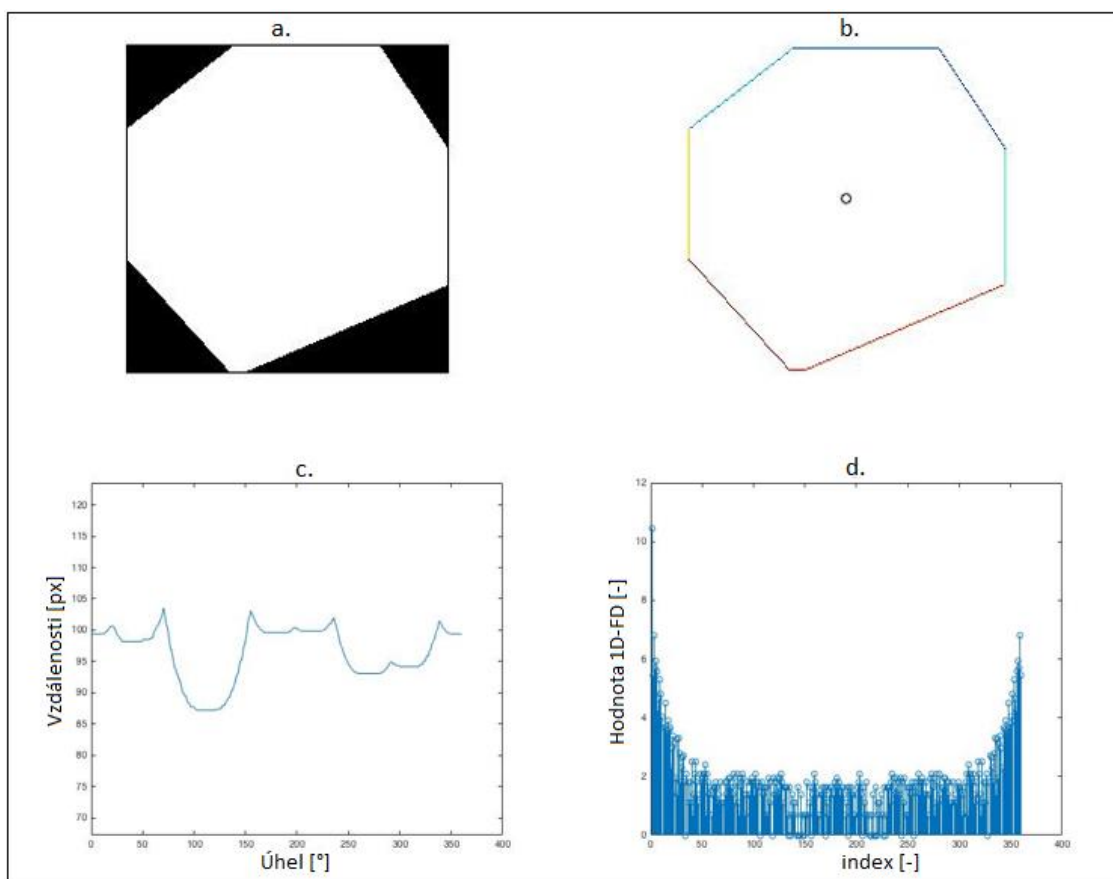
	Kosočtverec(200,60)	Kosočtverec(238,45)
Obsah	34838	40288
Obvod	786,71	937,32
Orientace	29,6	22,2
Délka hl. osy	283,7	360,4
Délka Vedl. osy	163,7	149
Centroidy	152,50 89,00	206,00 86,50
Kulatost	36	54,7
Hranatost	0,7	0,6
Kompaktnost	1,4	1,7
Počet hran	4	4
Délky hran	202 234 202 240	238 238 238 238
Min vzd. od C	86	83,5
Max vzd. od C	133,8	155,4
Prům. vzd. od C	94,6	96,7

**Tab. 11: Zernikovy momenty pro kosočtverec(238,45)**

m,n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	0,34	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,69	-	0,19	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	0,03	-	0,02	-	-	-	-	-	-	-
4	0,96	-	0,12	-	0,12	-	-	-	-	-	-
5	-	0,06	-	0,06	-	0,06	-	-	-	-	-
6	1,23	-	0,04	-	0,04	-	0,05	-	-	-	-
7	-	0,07	-	0,08	-	0,07	-	0,07	-	-	-
8	1,50	-	0,01	-	0,01	-	0,02	-	0,01	-	-
9	-	0,05	-	0,04	-	0,05	-	0,05	-	0,04	-
10	1,81	-	0,05	-	0,05	-	0,04	-	0,05	-	0,05

## MNOHOÚHELNÍK

Jak již bylo zmíněné v úvodu této sekce, do mnohoúhelníku je možné zařadit všechny zmíněné i další 2D tvary. Byla vytvořena funkce *VytvorMnolehelnik(n,m)*, která má na vstupu hodnotu  $n$  pro počet vrcholů (úhlů) a hodnotu  $m$  pro velikost čtvercového okna, do kterého pak uživatel zadá body, které se následně propojí a vytvoří tak mnohoúhelník.



**Obr. 11: Generování a popis mnohoúhelníku - a. mnohoúhelník vygenerovaný pomocí funkce *VytvorMnolehelnik(7,300)*, b. obrys generovaného mnohoúhelníku, c. vzd. bodů obrysu od centroidu, d. 1D-FD generovaného tvaru**

**Tab. 12: Geometrické deskriptory pro mnohoúhelník**

	Mnohouhelník(7,200)	Mnohouhelník(5,300)
Obsah	31490	40275
Obvod	647,38	768,13
Orientace	20,2	-74,3
Délka hl. osy	209,3	250,7
Délka vedl. osy	193,3	208,9
Centroidy	102,39 96,10	119,62 121,65
Kulatost	14,1	26
Hranatost	0,8	0,7
Kompaktnost	1,1	1,2
Počet hran	7	5
Délky hran	81 95 136 87 85 93 91	190 132 191 156 111
Min vzd. od C	87,2	93,4
Max vzd. od C	103,6	122,4
Prům. vzd. od C	96,4	106,8

**Tab. 13: Zernikovy momenty pro mnohoúhelník(5, 300)**

m,n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,18	-	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	0,04	-	0,04	-	-	-	-	-	-	-
4	0,18	-	0,04	-	0,04	-	-	-	-	-	-
5	-	0,04	-	0,04	-	0,04	-	-	-	-	-
6	0,39	-	0,04	-	0,04	-	0,04	-	-	-	-
7	-	0,03	-	0,03	-	0,03	-	0,03	-	-	-
8	0,39	-	0,02	-	0,02	-	0,03	-	0,00	-	-
9	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,01	-	0,02	-
10	0,55	-	0,00	-	0,02	-	0,01	-	0,02	-	0,01

## SROVNÁNÍ TVARŮ

Tvary byly generovány tak, aby v prvním sloupci tabulky geometrických deskriptorů byly hodnoty odpovídající danému objektu, který se vejde do čtverce o velikosti  $200 \times 200px$ , ve sloupci druhém pak byly tvary tvořeny tak, aby byl jejich obsah alespoň přibližně stejný z důvodu, aby pak bylo jejich porovnání co nejobjektivnější. V případě obdélníku a kosočtverce první z uvedených výroků neplatí. U obdélníku je to z důvodu, že aby měl obraz obdélníku rozlišení  $200 \times 200px$ , bylo by nutné zvolit  $a, b = 200$ , jednalo by se tedy o čtverec. Aby měl obraz kosočtverce zmíněné rozlišení, bylo by nutné zadat hodnoty hrana = 200, uhel = 90, opět by se tedy jednalo o čtverec.

Kromě 1D-FD, který je demonstrován za pomoci grafu, jsou u každého objektu uvedeny i zernikovy momenty, které by, podle teorie, měly mít vysokou vypovídající hodnotu o daném tvaru.

Samotné srovnání základních tvarů je uvedeno v příloze, nicméně čtenář je na základě informací v této sekci „od oka“ posoudit, jak se deskriptory různých tvarů pro různé velikosti liší. Jak již bylo zmíněno v předchozí sekci, základní tvary slouží



jako reference k reálným datům, sekce srovnání tvarů bude uvedena ve formě klasifikace uvedena dále.

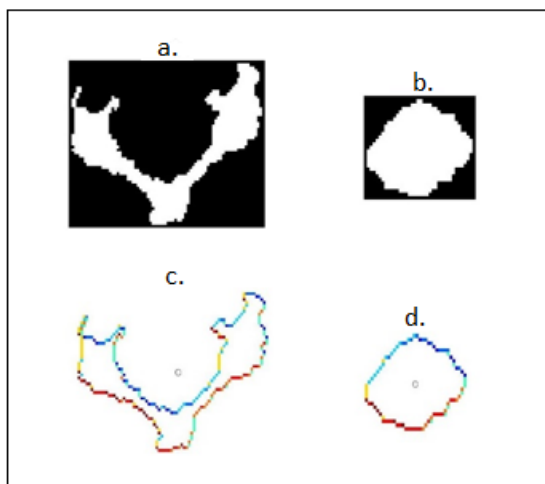
## 2.3 REÁLNÁ OBRAZOVÁ DATA

Reálná obrazová data jsou data, která jsou tvořena jinak než algoritmem. Může se tedy jednat o obrazová data získaná z nemocničních nebo z veřejně přístupných databází. Předmětem tvarové analýzy této práce jsou obratle. Páteř je tvořena 33-34 obratli, které se mohou lišit svým tvarem. Na základě znalostí, které by poskytla vhodná analýza, je možné jednotlivé obratle separovat a mohla je tak umožněna například pohodlnější diagnostika z pohledu vyšetřujícího. Bylo vybráno pět obratlů - C3, L3, L5, Th4 a Th10, na které byly aplikovány metody a procesy popsány skrze tuto práci.

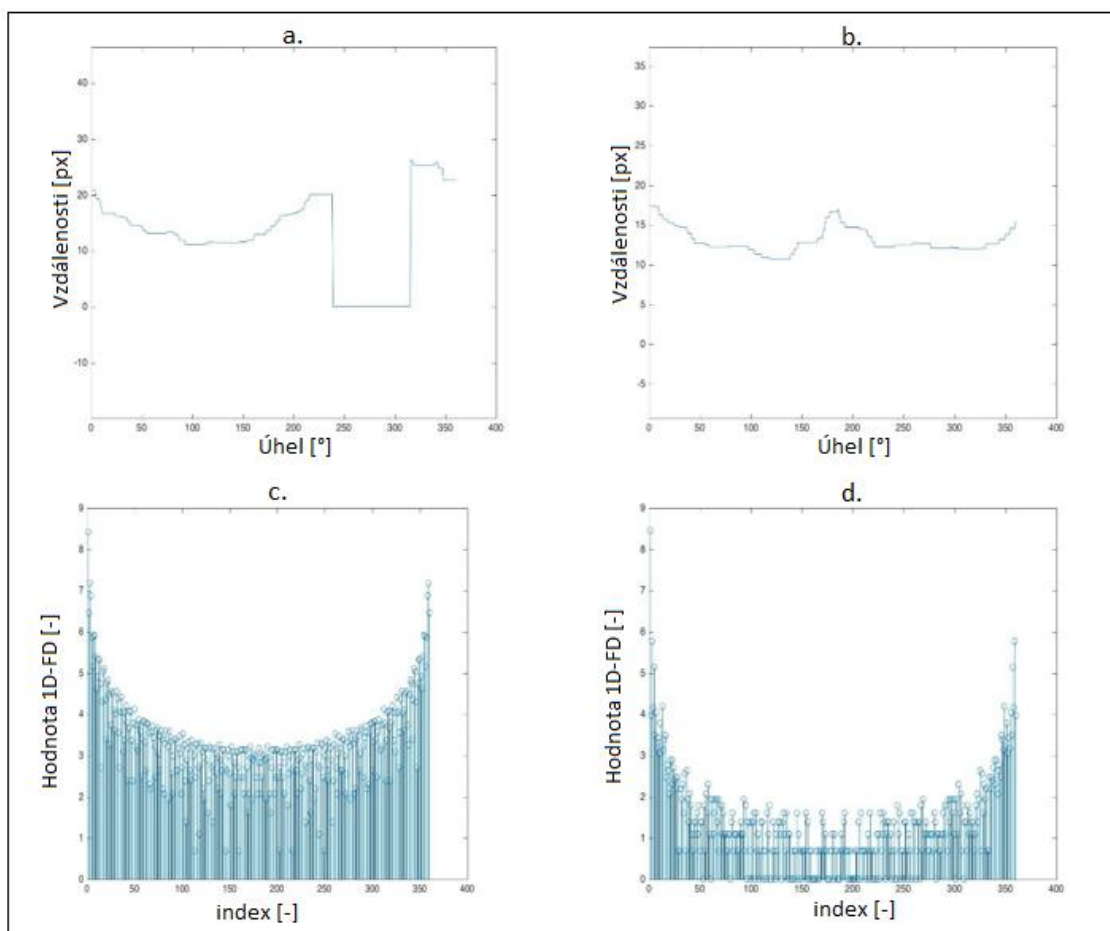
### 2.3.1 VÝSLEDKY ANALÝZY

V této podsekcí jsou prezentovány výsledky analýzy vybraných obratlů od tří pacientů. Je nutné uvést, že obratle jsou reprezentovány po řezech a tvoří tak 3D obraz, autor práce se tedy snažil najít řez, který popisuje daný obratel co nejlépe. S přístupem k silnějším výpočetním možnostem by se dala analýza vytvářet pro každý řez.

Jako příklad navržené tvarové analýzy poslouží obratel C3 prvního pacienta:



**Obr. 12:** Vyseparované části obratle a jejich obrys – a. první část obratle C3 prvního pacienta, b. druhá část obratle C3 prvního pacienta , c. obrys objektu z bodu a, f. obrys objektu z bodu b.



**Obr. 13:** Popis vyseparovaných částí obratle – a. vzdálenost bodu obrysu od centroidu pro první část obratle C3, b. vzdálenost bodu obrysu od centroidu pro druhou část obratle C3, c. 1D-FD pro první část obratle C3, d. 1D-FD pro druhou část obratle C3

**Tab. 14:** Geometrické deskriptory P1C3

Obratle	C3	
Pacient	P1	
Obsah	1140,00	646,00
Obvod	302,08	94,88
Orientace	12,20	11,80
Délka hl. osy	97,50	34,10
Délka Vedl. osy	48,60	24,50
Centroidy	42,65 30,09	20,38 16,62
Kulatost	167,20	34,20
Hranatost	0,30	0,70
Kompaktnost	6,40	1,10
Počet hran	10,00	3,00

**Tab. 15: Zernikovy momenty P1C3**

m,n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	0,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,02	-	0,21	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	0,19	-	0,21	-	-	-	-	-	-	-
4	0,08	-	0,07	-	0,04	-	-	-	-	-	-
5	-	0,07	-	0,19	-	0,08	-	-	-	-	-
6	0,03	-	0,14	-	0,02	-	0,14	-	-	-	-
7	-	0,07	-	0,06	-	0,10	-	0,06	-	-	-
8	0,02	-	0,12	-	0,11	-	0,03	-	0,09	-	-
9	-	0,08	-	0,04	-	0,06	-	0,06	-	0,02	-
10	0,15	-	0,10	-	0,08	-	0,07	-	0,05	-	0,03

**Tab. 16: Zernikovy momenty P1C3-2**

m,n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	0,21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,44	-	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	0,14	-	0,13	-	-	-	-	-	-	-
4	0,06	-	0,10	-	0,06	-	-	-	-	-	-
5	-	0,10	-	0,05	-	0,05	-	-	-	-	-
6	0,21	-	0,11	-	0,08	-	0,06	-	-	-	-
7	-	0,04	-	0,05	-	0,03	-	0,05	-	-	-
8	0,34	-	0,04	-	0,03	-	0,04	-	0,06	-	-
9	-	0,08	-	0,03	-	0,09	-	0,07	-	0,03	-
10	0,41	-	0,08	-	0,03	-	0,03	-	0,05	-	0,01

**Výsledky analýzy pro všechny ostatní obratle jsou uvedeny v přílohách.**

## 2.3.2 KLASIFIKACE OBRATLŮ

Celá myšlenka tvarové analýzy nakonec vede k automatizaci klasifikace tvarů v kvalitě podobné, jako analýza provedená expertem. Deskriptory, které jsou základem tvarové analýzy by měly poskytovat takové informace o obrazových datech, aby na jejich základě mohla být provedena klasifikace.

Klasifikaci obratlů lze provádět na základě porovnání deskriptorů jednotlivých obratlů s deskriptory získané z referenčních tvarů. K určení referenčních dat lze přistupovat více způsoby, jako dva základní je možné uvést:

- Referenční data jsou tvořeny analýzou takového objektu, který je expertem ohodnocen jako dostatečně vypovídající o dané problematice.
- Referenční data jsou tvořeny základními tvary, kde je analyzovaný objekt srovnán s každým z nich a na základě rozdílů je pak objekt zařazen do třídy.

V této práci byl využit první přístup, ale protože byly analyzovány pouze obratle nemocných pacientů, nebylo možné určit referenční tvar, nicméně byly pro tuto práci vytvořeny i základní neuronové sítě, aby čtenář získal porovnání mezi těmito způsoby klasifikace. Pro referenční tvar hammingovy sítě se autor rozhodl použít obratel daného typu vždy prvního pacienta.

### Hammingova síť

Princip hammingovy sítě byl popsán v kapitole teorie v sekci 1.3. Pro výpočet hammingových vzdáleností a klasifikaci obratlů byla vytvořena funkce *hamming\_obratle*, které mají na vstupu všechny analyzované objekty. Výsledkem je pět skupin, do kterých byly jednotlivé obratle zařazeny:

1. skupina



Obr. 14: Hammingova síť, shluk 1

2. skupina



Obr. 15: Hammingova síť, shluk 2

3. skupina



Obr. 16: Hammingova síť, shluk 3

4. skupina



Obr. 17: Hammingova síť, shluk 4

5. skupina



Obr. 18: Hammingova síť, shluk 5

## POROVNÁNÍ DESKRIPTORŮ

V této sekci je provedeno porovnání deskriptorů, které posloužilo jako vstupní data pro klasifikaci obratlů. Nejprve byly porovnány některé geometrické deskriptory, poté 1D-FD a nakonec zernikovy momenty jednotlivých obratlů.

K samotné klasifikaci bylo využito matlabovských funkcí *kmeans* a *fcm*, které zařazují objekty do jednotlivých skupin užitím binární klasifikace a klasifikace pomocí fuzzy logiky v tomto pořadí.

Binární klasifikace je provedena pomocí tabulky. Názvy v tabulce odpovídají:

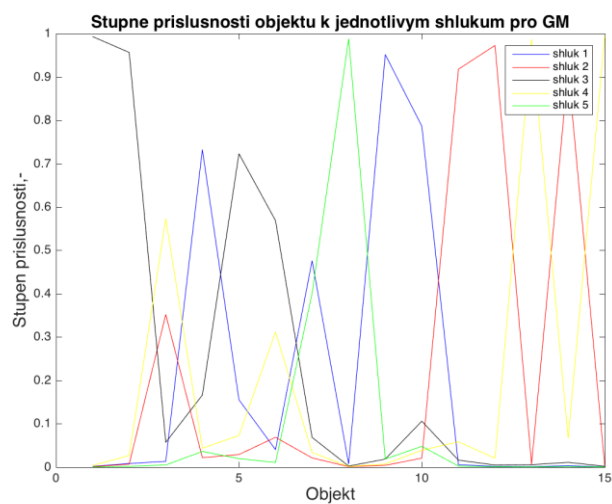
- GM = geometrické deskriptory
- FD = 1D-FD
- ZM = zernikovy momenty

**Tab. 17: Klasifikace obratlů – binární**

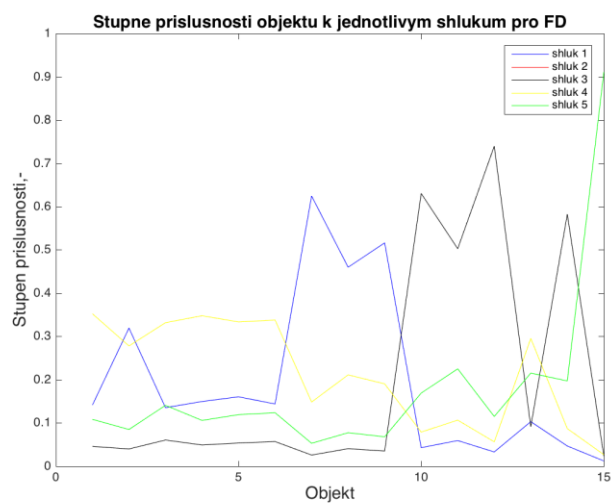
Id	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Pacient	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Obratel	C3	C3	C3	L3	L3	L3	L5	L5	L5	Th4	Th4	Th4	Th10	Th10	Th10
GM	1	1	5	3	1	1	3	2	3	3	4	4	5	4	5
FD	1	3	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4	1	4	5
ZM	1	1	1	2	3	2	3	4	3	4	3	5	5	5	4

Hodnoty a barva pole v tabulce značí shluk, do kterého byl obratel zařazen. Stejně hodnoty tedy představují objekty, které byly na základě deskriptorů zařazeny do stejného shluku.

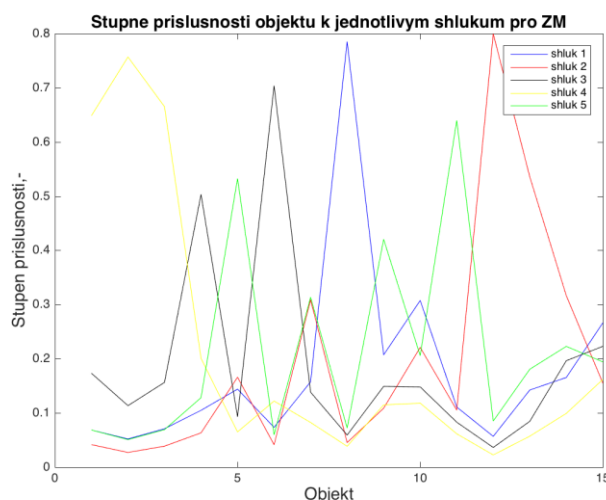
Výsledek klasifikace s užitím fuzzy logiky je realizován pomocí grafů. Obratlů bylo celkem patnáct – pět druhů obratlů, každý od tří pacientů. V grafu jsou na ose x vyneseny jednotlivé obratle, kdy první tři odpovídají jednomu druhu obratle pro každého pacienta, další tři pak dalšímu druhu obratle pro všechny pacienty. Tímto způsobem jsou obsaženy všechny objekty. Na ose y jsou znázorněny stupně příslušnosti objektu do shluku.



**Obr. 19: Stupně příslušnosti pro geometrické deskriptory**



**Obr. 20: Stupně příslušnosti pro 1D-FD**



Obr. 21: Stupně příslušnosti pro zernikovy momenty

### DOPŘEDNÁ NEURONOVÁ SÍŤ

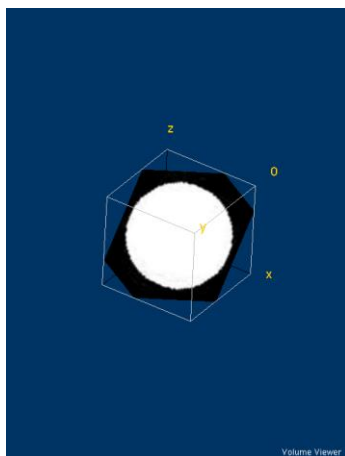
Protože je patrné, že byla klasifikace velmi nepřesná, byla vytvořena neuronová dopředná síť se 100 neurony v první vrstvě a 10 neurony ve vrstvě druhé. Dopředná síť nepodávala o mnoho lepší výsledky než klasifikace prezentovaná výše, z pěti měření pomocí dopředné sítě byl průměr nesprávně zařazených objektů přibližně šest. Výsledky je možné si prohlédnout v příloze.

## 2.4 GENEROVÁNÍ ZÁKLADNÍCH 3D OBJEKTŮ

Do základních 3D objektů tato práce řadí kouli, krychli, kvádr a jehlan. Stejně jako u generování 2D objektů, i u 3D byly objekty vygenerovány pomocí funkcí, která mají na vstupu rozměry objektu. Jsou tedy stejně jako 2D úplně škálovatelné a dají se proto využít jako referenční tvary. Pro zobrazení vygenerovaných objektů byl použit program ImageJ.

## KOULE

Ke generování koule byla vytvořena funkce *VytvorKouli(d)*, která vychází ze stejného principu, kterého bylo využito u generování kruhu, je tedy vypočítána vzdálenost jednotlivých bodů od centroidu v matici o zadaném rozměru, která je následně vyhodnocena. Pokud je vzdálenost nižší nebo rovna vstupu  $d/2$ , je do matice vepsána hodnota 1, v opačném případě je vepsána hodnota 0.



Obr. 22: Koule vygenerovaná pomocí funkce VytvorKouli(51)

## KRYCHLE

Krychli lze definovat jako čtverec, který je promítnut do prostoru. S takovou znalostí bylo přistupováno k tvorbě funkce *VytvorKrychli(a)*, která na má na vstupu velikost hrany  $a$ .

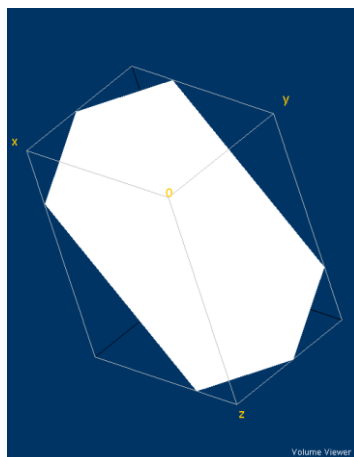


Obr. 23: Krychle vygenerovaná pomocí funkce VytvorKrychli(20)



## KVÁDR

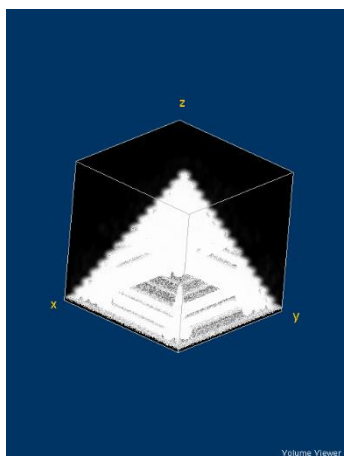
Krychli lze definovat jako obdélník, který je promítnut do prostoru. S takovou znalostí bylo přístupováno k tvorbě funkce  $VytvorKvadr(a,b,c)$ , která má na vstupu šířku  $a$ , výšku  $b$  a hloubku  $c$ .



Obr. 24: Kvádr vygenerovaný pomocí funkce  $VytvorKvadr(20,20,40)$

## JEHLAN

V případě této práce se jedná o generování jehlanu se středem, který svými souřadnicemi v rovině XY odpovídá souřadnicím středu podstavy v rovině XY. Generování probíhá pomocí tvorby jednotlivých "vrstevnic" při pohybu zdola nahoru. Popsaný proces je proveden ve vytvořené funkci  $VytvorJehlan(a,b,c)$ , která na svém vstupu bere rozměry jehlanu – šířku podstavy  $a$ , výšku podstavy  $b$  a výšku jehlanu  $c$ .



Obr. 25: Jehlan vygenerovaný pomocí funkce  $VytvorJehlan(30,30,40)$

## 2.4.1 VÝSLEDKY ANALÝZY 3D OBRAZOVÝCH DAT

Jak již bylo popsáno v kapitole teorie, v sekci 1.2.4, 3D objekty je možné popsat pomocí některých modifikovaných 2D deskriptorů. Jako ukázka analýzy 3D objektů poslouží koule, jejíž pravděpodobně nejdůležitější deskriptor je popsán následující tabulkou:

Tab. 18: Vzdálenosti bodů obrysu od centroidu

Vzdálenosti	Úhel $\phi$												
Úhel $\theta$	-179	-149	-119	-89	-59	-29	0	30	60	90	120	150	180
-89	25,1	25,0	25,2	25,1	25,0	25,2	25,0	25,3	25,1	25,1	25,3	25,1	25,0
-79	25,1	25,0	25,2	25,1	25,0	25,2	25,4	25,3	25,1	25,4	25,3	25,1	25,4
-69	25,1	24,9	25,2	25,1	24,9	25,2	24,9	25,2	25,1	24,9	25,2	25,1	24,9
-59	25,1	25,0	25,1	25,1	25,0	25,1	24,9	25,2	25,1	24,9	25,2	25,1	24,9
-49	25,1	25,0	25,1	25,1	25,0	25,1	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2
-39	25,1	25,2	25,3	25,1	25,2	25,3	25,1	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,1
-29	25,1	25,2	25,3	25,1	25,3	25,2	25,0	25,1	25,1	25,1	25,1	25,1	25,0
-19	25,1	25,0	25,4	25,1	25,3	25,2	25,1	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	25,1
-9	25,1	25,0	25,4	25,1	25,3	25,2	25,3	24,8	25,2	25,4	25,2	24,8	25,3
0	25,1	25,0	25,1	25,1	25,3	25,1	25,0	24,8	25,2	25,0	25,2	24,8	25,0
10	25,1	25,0	25,3	25,1	25,3	25,1	25,4	24,8	25,2	25,4	25,2	24,8	25,4
20	25,1	25,0	25,3	25,1	25,3	25,1	24,9	25,1	25,2	25,4	25,2	25,1	24,9
30	25,1	25,0	25,4	25,1	25,3	25,1	24,9	25,3	25,3	25,2	25,3	25,3	24,9
40	25,1	25,1	25,2	25,1	25,2	25,1	24,9	25,1	25,1	25,3	25,1	25,1	24,9
50	25,1	25,0	25,3	25,1	25,1	25,2	25,1	25,1	25,1	25,1	25,1	25,1	25,1
60	25,1	25,0	25,3	25,1	25,1	25,2	25,0	25,2	25,2	25,0	25,2	25,2	25,0
70	25,1	24,9	25,0	25,1	24,9	25,0	25,1	25,2	25,2	25,1	25,2	25,2	25,1
80	25,1	24,9	25,0	25,1	24,9	25,0	25,3	25,0	25,2	25,3	25,0	25,2	25,3
90	25,1	24,9	25,0	25,1	24,9	25,0	25,0	25,0	25,2	25,1	25,0	25,2	25,1

Ostatní deskriptory je možné nalézt v příloze.

## 3 ZÁVĚR

Závěr je rozdělen na dvě sekce – problémy realizace tvarové analýzy, která vysvětluje poznatky ze sekce druhé - shrnutí výsledků.

### 3.1 PROBLÉMY REALIZACE TVAROVÉ ANALÝZY

Práce obsahuje v teoretické části detailní popis základních i pokročilejších metod tvarové analýzy obrazových dat. Teoretické znalosti jsou poté aplikovány na vygenerované tvary, které byly předem jasně definované, proto je možné ověřit, které deskriptory se hodí pro jednotlivé tvary.

Je nutné poznamenat, že algoritmus rozeznávající hrany a jejich velikosti je v případě kruhu nefunkční. Není to ovšem tak úplně chybný výsledek - u kruhu je zcela nelogické určovat počet a délku hran. Hrana je v geometrii označována jako úsečka spojující dva vrcholy. Z toho vyplývá, že kruh v obrazu může být definován 0 hranami nebo X hranami, kde X označuje číslo, které je nižší, než suma pixelů obrysu kruhu a vyšší nebo rovno 4. Při běžném pohledu na kruh není nesprávné uvažovat, že má kruh 0 hran, protože by se v takovém tvaru teoreticky neměly vyskytovat žádné vrcholy. V případě počítačového vidění a definice obrazu v rastrovém formátu je situace ovšem zcela odlišná.

Je nutné si uvědomit, že právě MATLAB, ve kterém je kruh vytvořen, využívá rastrový formát obrazu, to znamená, že při dostatečném poloměru (průměru) kruhu se v obrysu objevuje dostatečně dlouhá série pixelů o stejném směru, která spojuje „vrcholy“ a je následně klasifikována jako hrana. Z toho také vyplývá, že se zvyšujícím se poloměrem (průměrem) kruhu se bude zvyšovat i počet nesprávně detekovaných hran. Jako příklad nejlépe poslouží následující tabulka reprezentující nejmenší možný kruh v rastrovém formátu:

0	1	0
1	0	1
0	1	0

Tab. 19: Ukázka kruhu o velikosti  $r=1\text{px}$

V rastrovém formátu by objekt definovaný v tabulce výše mohl být považován za kruh se 4 hranami, protože hodnoty 1 v tabulce představují „vrcholy“ kruhu.

Dále je nutné poznamenat, že výpočet orientace kruhu je opět "nefunkční" a stejně tak je nelogické u kruhu orientaci určovat. Vzdálenost obrysových pixelů od středu ideálního kruhu je vždy stejná, orientaci je tedy nemožné určit. Hodnoty, které jsou zapsané v tabulce v podsekcí Kruh jsou výsledkem nedokonalostí použitého rastrového formátu obrazu.

Problémy s určením délky hran, který vychází právě z detekce hran, je dalším problematickým deskriptorem, který se jeví jako velmi nespolehlivý. Použitý algoritmus, který byl popsán v sekci 2.3.4, má problém se směry pod různými úhly, které jsou tvořeny dvěma vektory. Pro představu je možné uvést úsečku, která vede z pravého dolního rohu obrazovky počítače do jeho levého horního rohu.

Při předpokladu, že obrazovka nemá poměr stran 1:1 (PC obrazovky mívají nejčastěji poměr stran 16:9), bude tato úsečka vedena pod úhlem, který je jiný než 45 stupňů. Taková úsečka je v rastrovém formátu provedena pomocí dvou vektorů obrysu (viz. sekce 1.1.3) - nahoru a doleva, které nakonec po jejich vzájemné kombinaci dovedou úsečku až do levého horního rohu. Použitý algoritmus detekce využívá matematické funkce *modus*, která určí nejčastější hodnotu v detekované hraně, a pokud je "celkový" vektor hrany diagonální, je tato hrana vynásobena hodnotou  $\sqrt{2}$  ze zřejmých důvodů. Problém tedy nastává ve zmíněném případě, kdy je úsečka (hrana) vedena pod úhlem jiným než 45 stupňů - hodnota modusu takové hrany je rovna vektoru jinému než diagonálnímu, tím pádem je výsledný deskriptor chybný.

Další záležitostí, která negativně ovlivňuje výsledky práce je určení centroidu nepravidelného, nekonvexního tvaru. Centroid se často v takových případech nachází mimo samotný objekt, následkem jsou pak neúplné výpočty vzdáleností od centroidu, které z principu použité metody neobsahují informace o vzdálenosti obrysu od centroidu definované ve směru, ve kterém se nenachází obrysový bod. Hodnoty těchto výsledků jsou nahrazeny nulami, aby bylo alespoň dosaženo 360-ti prvků, které jsou potřebné pro klasifikaci objektu.

V kapitole *Řešení*, v sekci 2.4.2, jsou použity deskriptory pouze takové, které mohou reálně přispět k analýze tvaru v případě zvolených obratlů. Počet a délky hran jsou při takto složitých tvarech nepoužitelné z důvodů zmíněných výše. Minimální, maximální a průměrné vzdálenosti od centroidu jsou nahrazeny vzdálenostmi pod jednotlivými úhly a byly by tak redundantní. Délky hlavních a vedlejších os jsou pak zastoupeny kompaktností, která kombinuje tyto dva deskriptory.

Autor zamýšlel klasifikaci obrazů, řešenou v sekci 2.3.2 vytvořit nejen pro celé objekty v obrazových datech, ale i pro jejich obrysy. K tomu by ovšem bylo zapotřebí, aby byly obratle jednotlivých pacientů buď všechny spojeny, nebo naopak rozpojeny, aby bylo možné vytvořit porovnatelný obrys. Protože toto nebylo splněno, nebylo možné takovou analýzu provést.

Jako pravděpodobně největší problém, který v práci vyvstal v souvislosti s klasifikací obrazů pomocí neuronových sítí, je dán tím, že dostupné obrazy neměly stejné rozměry a jednotlivé řezy si neodpovídaly. Došlo tedy k množství úprav, které manipulovaly s obrazem v prostoru 2D i 3D, důsledkem může být přesun informace

na jiný řez/pozici, což vede ke znehodnocení výsledku dosaženého pomocí dopředné neuronové sítě.

## 3.2 SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ

V prostředí MATLAB se podařilo vytvořit dílčí procesy analýzy tak, jak byly popsány v části teorie. V této sekci jsou shrnuty a zhodnoceny kroky, které byly popsány v kapitole řešení.

### GENEROVÁNÍ ZÁKLADNÍCH 2D TVARŮ

Na generovaných tvarech lze s největší jistotou určit, jestli jsou použité metody smysluplné, respektive jestli jsou dosažené výsledky správné. Jak již bylo popsáno na začátku této kapitoly, u některých tvarů se nepodařilo jasně určit některé z geometrických deskriptorů a sloužily pouze jako orientační hodnoty. Naopak, správně určené deskriptory posloužily jako zdroj informací, na jejichž základě je možné jednotlivé tvary popsat a porovnat.

Jak již bylo zmíněno v sekci 2.2., v tabulkách, které lze najít u každého generovaného tvaru, je v prvním sloupci vytvořen daný tvar tak, aby se vešel do obrazu o velikosti 200 x 200px. Na základě těchto znalostí je možné konstatovat, že:

- Největší hodnota obsahu vychází u čtverce, který zaplní celý obraz
- Nejmenší hodnoty kulatosti a kompaktnosti, které představují nejkulatější, respektive nejkompaktnější tvary, je možné objevit u kruhu
- Nejhranatější tvary popsané hranatostí s hodnotou 1 je možné vidět u čtverce a obdélníku.

Deskriptor vzdálenosti od centroidu a na něm založený 1D-FD jsou znázorněné opět pro každý vygenerovaný tvar zvlášť, aby bylo možné provést alespoň vizuální analýzu výsledků a definovat jasně viditelné rozdíly mezi tvary. U grafů vzdáleností jsou jasně zřetelné píky znázorňující vrcholy tvaru, z toho vyplývá, že je kruh v takovém grafu definován vodorovnou úsečkou, protože „nemá“ vrcholy. 1D-FD je následně tvořen pomocí FT použité na zmíněnou vzdálenost.

Zernikovy momenty popisují „složitost“ tvarů. Podle výpočtu ZM je nejjednodušším tvarem kruh, který je definován nízkými hodnotami jednotlivých ZM. Naopak, nejsložitějším tvarem je podle výpočtů prezentovaný obdélník o rozměrech 100 x 400.

### REÁLNÁ DATA

Na reálná data byly aplikovány některé metody popsané skrze tuto práci s vědomím, že pouze některé z nich podávají kvalitní výsledky, na kterých je založena klasifikace. Výsledky tvarové analýzy jednotlivých obrázků lze nalézt v přílohách.

Hodnoty jednotlivých deskriptorů jsou využity pro tvorbu **klasifikace**, která následuje tuto sekci a proto jsou výsledky analýzy na reálných datech diskutovány až v ní.

## KLASIFIKACE

I přes to, že byly pro závěrečnou klasifikaci použity pouze deskriptory, které podávaly kvalitní výsledky, je nutné konstatovat, že byla klasifikace úspěšná pouze z části. V sekci 2.3.2 je pro klasifikaci nejprve využita hammingova síť a následně metody *kMeans* a *fcm* pro binární i fuzzy klasifikaci v tomto pořadí.

Výsledky dosažené pomocí hammingovy sítě jsou velmi zavádějící, protože byly jako referenční obrazy vybrány vždy obratle daného typu prvního pacienta. Jak je možné vidět na obrázcích v sekci 2.3.2. hammingova síť v případě první skupiny klasifikovala správně jeden objekt ze tří možných, v druhém pak dva objekty ze tří, ve třetím případě zařadila všechny objekty správně, nicméně byly do stejné skupiny zařazeny i další dva objekty, do čtvrté skupiny byly zařazeny všechny objekty správně, ale opět došlo k špatnému zařazení jednoho objektu do této skupiny a do poslední skupiny byl zařazen pouze jeden objekt správně.

Na základě porovnání deskriptorů byla provedena klasifikace, jejíž výsledky jsou zaznamenány v tabulce a grafech v sekci 2.3.2. Z výsledků v tabulce jasně vyplývá, že pro:

- Geometrické deskriptory – byly do shluků reprezentující obratle L5, Th4 a Th10 zařazeny správně vždy dva ze tří objektů, v případě obratlů C3 a L3 není zcela jednoznačné, která skupina reprezentuje který obratel, protože se v obou případech v tabulce vyskytuje dvakrát hodnota 3
- 1D-FD – byly zcela správně zařazeny objekty reprezentující obratle L5, Th4 a Th10, pro obratle C3 a Th10 opět není zcela jednoznačné, který shluk reprezentuje typ obratle
- Zernikovy momenty – byly zcela správně klasifikovány objekty reprezentující obratel C3, pro obratle L3, L5 a Th10 byly správně zařazeny vždy dva objekty ze tří a pro obratel Th4 byl správně klasifikován pouze jeden obratel

Fuzzy klasifikace na základě porovnání deskriptorů poskytuje detailnější popis řazení objektů, protože je určena stupněm příslušnosti k danému shluku. Výsledky jsou ovšem logicky stejné, jako je tomu v tabulce popisující binární klasifikaci, platí proto stejný závěr, který byl popsán výše. Je tedy zřejmé, že klasifikace, která je založena na porovnání deskriptorů jednotlivých obratlů, je pro různé metody různě účinná. Nejlepší výsledky obecně podával 1D-FD, který zařadil tři typy obratlů, tedy devět obrazů, do správných skupin (shluků) a předčil tak hammingovu síť, která do

správných shluků zařadila dva obratle. O poznání horší výsledky podávaly metody založené na rozdílu geometrických deskriptorů a zernikových momentů.

Také z důvodu relativně neúspěšné klasifikace byla do práce přidána i dopředná neuronová síť, která podávala horší výsledky než zmíněné metody a to i přes to, nebo právě z důvodu, že byla tato síť naučena za pomoci informací všech řezů každého obratle. Obrazová data, které byly k dispozici neměly stejné rozměry a muselo dojít k různým úpravám obrazu tak, aby bylo možné použít některé z metod analýzy, to ovšem mohlo v důsledku znamenat, že se informace nacházely na jiných řezech, respektive na jiných pozicích než u stejného typu obratle jiného pacienta a docházelo tak k nesprávné klasifikaci.

Na základě provedené tvarové analýzy obratlů, respektive na deskriptorech získaných pomocí analýzy, byla provedena klasifikace, která byla v mnoha případech velmi nepřesná, v této podobě by tedy nemohla být využita v biomedicínském prostředí např. při diagnostice, protože diagnostika vyžaduje velkou spolehlivost, které nebylo v této práci dosaženo.

Je zcela možné, že pokud by obratle byly pořízeny konzistentně, tedy ve stejných rozměrech, klasifikace by vyšla o poznání lépe.

# LITERATURA

- [1] Kozumplík J., Provazník J., *Umělá inteligence v medicíně*, 2007 [online], Dostupné z URL: <https://moodle.vutbr.cz/mod/resource/view.php?id=98718>
- [2] O'GORMAN, Lawrence., Michael J. SAMMON a Michael. SEUL. *Practical algorithms for image analysis: description, examples, programs, and projects*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2008. ISBN 978-0-521-88411-2.
- [3] Dallas Little, Joe Button, Priyantha Jayawickrama, Mansour Solaimanian, Barry Hudson *QUANTIFY SHAPE, ANGULARITY AND SURFACE TEXTURE OF AGGREGATES USING IMAGE ANALYSIS AND STUDY THEIR EFFECT ON PERFORMANCE* [online]. 2003 Dostupné z URL: <http://www.tti.tamu.edu/documents/0-1707-4.pdf>.
- [4] Taleb Al-Rousan, Eyad Masad, Erol Tutumluer, Tongyan Pan *Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics* [online]. 2006 Dostupné z URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061806000377>.
- [5] Nor Azura Md Ghani, Choong-Yeun Liong, Abdul Aziz Jemain *Analysis of geometric moments as features for rearm identification* [online]. 2010 Dostupné z URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379073810000630>.
- [6] *Image Noise and Filtering* [online]. 2012 Dostupné z URL: <http://www.coe.utah.edu/~cs4640/slides/Lecture6.pdf>.
- [7] Dengsheng Zhang, Guojun Lu *Shape-based image retrieval using generic Fourier descriptor* [online]. 2002 Dostupné z URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092359650200084X>.
- [8] MATLAB toolbox Image Processing Toolbox Dostupné z URL: <https://www.mathworks.com/products/image.html>.
- [9] COSTA, Luciano da Fontoura. a Roberto Marcondes. CESAR. *Shape classification and analysis: theory and practice*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2009. Image processing series. ISBN 9780849379291.
- [10] Whoi-Yul Kim, Yong-Sung Kim, *A region-based shape descriptor using Zernike moments* [online]. 2000 Dostupné z URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0923596500000199>.
- [11] M.-K. Hu, *Visual pattern recognition by moment invariants*, IRE Trans. Inform. Theory IT-8, 1962 Dostupné z URL: <http://www.sci.utah.edu/~gerig/CS7960-S2010/handouts/Hu.pdf>.
- [12] G. Granlund, G. Granlund, *Fourier preprocessing for hand print character recognition*, IEEE Trans. Computers 21, 1972 Dostupné z URL: <http://www.sci.utah.edu/~gerig/CS7960-S2010/handouts/Teh-Chin-IEEE-TPAMI-1988.pdf>
- [13] E. Persoon, K.-s. Fu, E. Persoon, K.-s. Fu, *Shape discrimination using Fourier descriptors*, IEEE Trans. Syst. Man Cybern. SMC-7, 1977 Dostupné z URL:



<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21869355>

[14] Amir Tahmasbi *A region-based shape descriptor using Zernike moments*

[online]. 2000 Dostupné z URL: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/38900-zernike-moments>>.

[15] NEAL, F. Brent. a John C. RUSS. *Measuring shape*. Boca Raton: CRC Press, c2012. ISBN 9781439855980.

[16] Mikšík O., *Praktické využití metod digitálního zpracování obrazu [online]*, 2007

Dostupné z URL: <http://soc.nidv.cz/data/2007/01-2.pdf>

[17] Hlaváč V., *Matematická morfologie [online]*, Dostupné z URL:

<http://people.ciirc.cvut.cz/~hlavac/TeachPresCz/11DigZprObr/71->

[3MatMorpholBinCz.pdf](#)

[18] Neil Strickland, *Spherical polar Coordinates [online]*, Dostupné z URL: [https://neil-](https://neil-strickland.staff.shef.ac.uk/courses/MAS243/lectures/lecture10.pdf)

[strickland.staff.shef.ac.uk/courses/MAS243/lectures/lecture10.pdf](https://neil-strickland.staff.shef.ac.uk/courses/MAS243/lectures/lecture10.pdf)

[19] Utah University, *Cylindrical and Spherical Coordinates [online]*, Dostupné z URL:

<https://www.math.utah.edu/lectures/math2210/9PostNotes.pdf>

# Seznam příloh

Příloha 1. CD obsahující všechny výsledky tvarové analýzy a zdrojové kódy k ní vedoucí